



**Уральский
федеральный
университет**

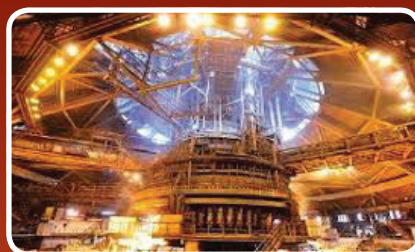
имени первого Президента
России Б. Н. Ельцина

**Институт новых материалов
и технологий**

**Л. Ю. ГИЛЕВА
Л. И. КАПЛУН
С. А. ЗАГАЙНОВ**

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧУГУНА

Учебное пособие



Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Л. Ю. Гилева,
Л. И. Каплун,
С. А. Загайнов

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧУГУНА

Учебное пособие

Под общей редакцией доктора технических наук,
профессора С. А. Загайнова

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета
для студентов вуза, обучающихся
по направлениям подготовки
22.03.02 — Metallургия,
22.03.01 — Материаловедение и технологии материалов

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2021

УДК 669.162(075.8)

ББК 34.323я73

Г47

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *А. М. Амдур* (заведующий кафедрой химии Уральского государственного горного университета);

д-р техн. наук, ст. науч. сотр. *Ю. А. Фролов* (Научно-производственное предприятие «Уралэлектра»)

Гилева, Л. Ю.

Г47 **Металлургия чугуна : учебное пособие / Л. Ю. Гилева, Л. И. Каплун, С. А. Загайнов ; под общ. ред. С. А. Загайнова ; М-во науки и высш. образования РФ. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2021. — 128 с.**

ISBN 978-5-7996-3393-6

В издании рассмотрены основы металлургии чугуна: общая технологическая схема получения чугуна в доменных печах; основные физико-химические процессы доменной плавки. Изложены основные подходы к описанию явлений доменной плавки.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям «Металлургия», «Материаловедение и технологии материалов», а также направлениям подготовки, в рамках которых изучаются вопросы получения и обработки металлов.

Библиогр.: 5 назв. Рис. 41. Табл. 4. Прил. 1.

УДК 669.162(075.8)

ББК 34.323я73

ISBN 978-5-7996-3393-6

© Уральский федеральный
университет, 2021

Оглавление

Предисловие	4
Введение	5
1. Технологическая схема получения чугуна в доменных печах	15
1.1. Комплекс доменной печи	15
1.2. Показатели работы доменной печи	24
1.3. Доменные чугуны	26
Контрольные вопросы к главе 1	29
2. Доменный процесс	30
2.1. Общая характеристика доменного процесса	30
2.2. Восстановление оксидов железа	34
2.3. Восстановление примесных элементов	55
2.4. Десульфурация чугуна в доменной печи	62
2.5. Испарение влаги, разложение гидратов и карбонатов	65
2.6. Образование чугуна и шлака	68
2.7. Процессы шлакообразования	70
2.8. Горение топлива	78
2.9. Изменение количества и состава газа по высоте доменной печи ...	84
2.10. Тепловые процессы доменной плавки	85
2.11. Закономерности движения шихтовых материалов	92
2.12. Закономерности движения газов	101
2.13. Условия ровного схода шихты	103
Контрольные вопросы к главе 2	106
3. Балансовые расчеты доменной плавки	109
3.1. Общий материальный баланс доменной плавки	109
3.2. Расчет доменной шихты	110
3.3. Расчет выхода и состава чугуна и шлака	113
3.4. Расчет расхода дутья	116
3.5. Расчет выхода и состава колошникового газа	117
3.6. Общий тепловой баланс доменной плавки	120
3.7. Анализ теплового баланса	121
Контрольные вопросы к главе 3	124
Рекомендуемый библиографический список	125
Приложение	126

Предисловие

При подготовке учебного пособия по первой части «Металлургия чугуна» дисциплины «Металлургия черных металлов» мы исходили из следующих соображений. Специалист, работающий в металлургической промышленности, наряду с сохранением глубоких знаний по выбранной специальности должен обладать более широким кругозором и понимать существо основных металлургических технологий получения и обработки металлов. С этой целью обучение ведется по двухуровневой системе. На начальном этапе в ходе изучения общих металлургических дисциплин каждый студент независимо от своей будущей специализации должен получить определенный минимум знаний по всему спектру металлургических наук и техник. Решению этой задачи и должно помочь настоящее учебное пособие, содержащее начальные сведения о теории и технологии получения чугуна в доменных печах — металлургии чугуна. На последующих этапах обучения студенты, выбравшие траекторию «Металлургия черных металлов», в ходе освоения специальных курсов получают углубленные знания о современном состоянии теории и технологии доменной плавки.

Материалы, включенные в учебное пособие, соответствуют концепции преподавания комплекса дисциплин, реализуемого кафедрой «Металлургии железа и сплавов» Уральского федерального университета, отметившей в 2020 году 100-летний юбилей, и основаны на традициях уральской научно-педагогической школы, созданной и развитой И. А. Соколовым, Н. Г. Маханьком, П. Н. Грековым, В. И. Коротичем, Н. С. Шумаковым, О. П. Онориным и другим учеными УрФУ.

В учебном пособии рассмотрены основы металлургии чугуна: общая технологическая схема получения чугуна в доменных печах; основные физико-химические процессы доменной плавки; изложены основные подходы к описанию явлений доменной плавки; приведены методики балансовых расчетов доменной плавки, лежащие в основе выбора основных параметров процесса.

Введение

Металлургия является одной из базовых, наиболее динамично развивающихся отраслей российской промышленности, которая может внести весомый вклад в обеспечение экономического роста в России в XXI веке.

Отрасль сложна с технологической и маркетинговой точки зрения — на мировом рынке у нее сильные конкуренты, такие как Китай, Япония, Южная Корея.

Металлургический комплекс включает в себя черную и цветную металлургию. Доля черной металлургии составляет около 10 % от объема промышленного производства России и примерно 80 % от общего объема производства металлов.

Несколько десятилетий назад эксперты были уверены в крахе сталелитейной промышленности из-за широкого распространения композитных материалов. Впрочем, несмотря на великолепные характеристики, такие материалы не заменили обычной стали.

Объем производства черных металлов определяется потребностью промышленности в металле и зависит от развития экономики в целом. На рис. 1 приведена динамика мирового потребления стали.

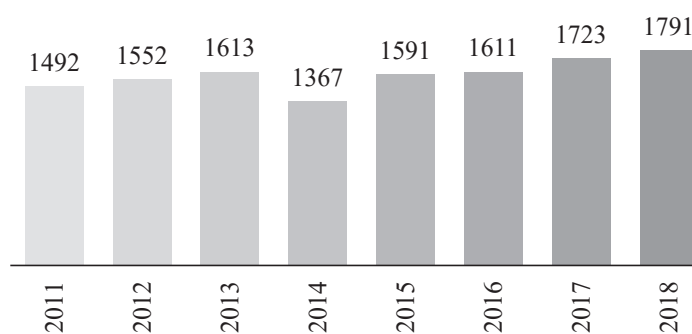


Рис. 1. Диаграмма потребления продукции черной металлургии, млн т

Производство стали по регионам приведено на рис. 2. В 2019 году в России произведено 70 млн т стали, что составляет 4 % от мирового производства (1,8 млрд т).



Рис. 2. Производство стали по регионам (2018 год)

Черную металлургию отличает высокий уровень концентрации и монополизации производства. Более 80 % объема промышленного производства черной металлургии России приходится на 9 крупных компаний: «Новолипецкий металлургический комбинат», «ЕвразХолдинг», «Северсталь», «Магнитогорский металлургический комбинат», «Металлинвест», «Мечел», «Трубная металлургическая компания», «Объединенная металлургическая компания», «Группа “Челябинский трубопрокатный завод”» (рис. 3).

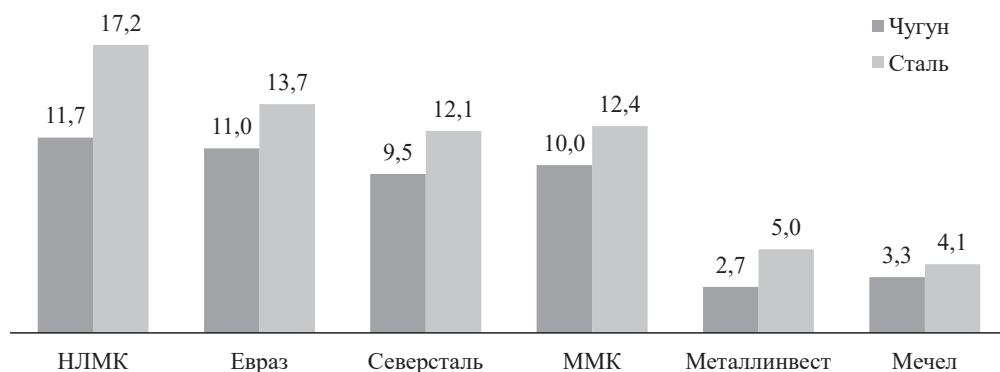


Рис. 3. Диаграмма производства черных металлов ведущими металлургическими компаниями России, млн т

В технике сплавы на основе железа принято называть *черными металлами*, а их производство — *черной металлургией*.

Черные металлы имеют широкое распространение:

- благодаря отличным механическим свойствам железа (прочность, пластичность) они хорошо поддаются ковке, прокатке и другим видам механической обработки;
- имеют относительно дешевое производство благодаря массовости;
- с помощью специальных способов обработки черным металлам можно придать особые свойства: электромагнитные, жароупорность, устойчивость против коррозии и др.

Непременный компонент железных сплавов — углерод. Углерод придает сплавам прочность, твердость, снижает их пластичность.

Железоуглеродистые сплавы принято разделять на железо, сталь и чугун по содержанию в этих сплавах углерода (не более 0,15 %; 0,15—2,16 %; 2,16—4,5 %). Основные технологические различия между этими сплавами заключаются в следующем:

- железо обладает пластичностью даже в холодном виде;
- сталь, сохраняя пластичность при высоких температурах, отличается большей прочностью и твердостью;
- чугун и при высокой температуре не пластичен, хрупок.

Железо в чистом виде в природе практически не встречается. В виде химических соединений, в основном в виде оксидов железа Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , реже — карбонатов FeCO_3 , гидроксидов $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ($\text{FeO} \cdot \text{OH}$) и сложных природных алюмосиликатов железа, оно входит в состав более чем 350 минералов и горных пород, то есть распространено в природе достаточно широко. Среднее содержание железа в верхней зоне земной коры составляет в среднем до 5 %. В некоторых горных породах содержание железа доходит до 50—60 %, а такие горные породы, как гранит, базальт, диабаз, содержат 3—9 % железа.

Горные породы, содержащие железо в такой форме и в таком количестве, что его экономически выгодно извлекать на данной стадии развития техники, называют *железной рудой*.

Первоначально использовали лишь очень богатые железом (выше 60 %) и чистые от примесей железные руды. Благодаря использованию различных методов предварительной подготовки руд к плавке, в переработку пускаются руды, в которых железо находится в виде оксидов, с содержанием железа от 14 %.

Железные руды не являются мономинеральными образованиями. Они состоят из устойчивых сочетаний минералов. Слагающие железную руду минералы принято делить на две группы:

- к первой группе относят так называемые *рудные материалы* — минералы, несущие в себе главную массу всего железа руды;
- остальные минералогические составляющие, совсем не содержащие железа или содержащие ее в незначительном количестве, называются *пустой породой*.

Рудные материалы, как правило, представлены оксидами двух- и трехвалентного железа — гематитом и магнетитом (химические формулы Fe_2O_3 и Fe_3O_4), реже карбонатом железа (FeCO_3) и силикатом железа (FeSiO_3).

Пустая порода состоит в основном из оксидов кремния (SiO_2), содержание которых в пустой породе наибольшее, оксидов алюминия (Al_2O_3) и магния (MgO). Иногда в состав пустой породы входит оксид кальция (CaO).

Анализ состава железных руд позволяет сформулировать две *основные технологические задачи*, которые необходимо выполнить для получения чугуна из железорудных материалов:

- отделить железо от кислорода;
- отделить восстановленное железо от пустой породы.

Необходимость краткой исторической справки обусловлена тем, что современный процесс производства железа из железных руд является результатом многовекового развития. История развития способа плавки железных руд показывает, что он не был изобретен каким-либо одним лицом, а является плодом коллективного творчества многих поколений металлургов, осуществивших постепенный многовековой переход к современным способам получения железа. И только последние 150 лет данный процесс стали изучать. За этот период конструкция агрегатов и технология существенно изменились, процесс постоянно совершенствуется, но основные химические реакции остаются неизменными.

Начало производства и систематического применения человеком железа в истории материальной культуры связывают с открытием сыродутного процесса, при котором железо восстанавливалось из оксидов руды при сравнительно низкой температуре (900–1000 °C) в рабочем пространстве сыродутного горна.

Сыродутный горн выкладывался из обожженной глины и располагался у подножия холма (рис. 4), что позволяло использовать естественную тягу воздуха через всегда открытую шлаковую лётку. Высота горна составляла первоначально 1–2,5 м.

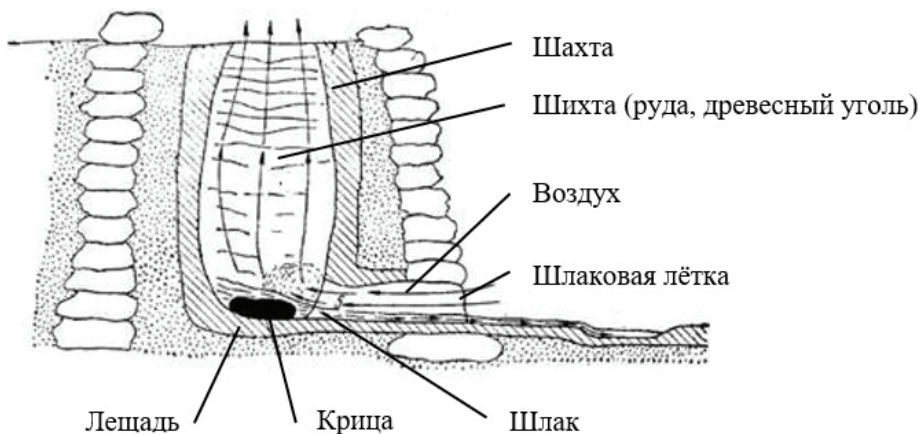


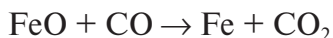
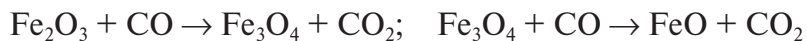
Рис. 4. Схема сыродутного горна¹

Сыродутный горн относится к шахтным печам. Шахтными называют печи, рабочее пространство которых вытянуто по вертикали.

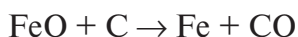
Долгое время способ получения железа в сыродутных горнах оставался без изменений. Заключался данный процесс в следующем. Печь первоначально разогревали сжиганием древесного угля. Затем чередующимися слоями вместе с древесным углем в горн загружалась железная руда. Древесный уголь поджигали. Под действием естественного подсоса воздуха, вызванного перепадом давления по высоте горна, древесный уголь горел с образованием монооксида углерода:



Монооксид углерода вступал во взаимодействие с оксидами железа, присоединяя к себе кислород с образованием диоксида углерода. Железо при этом восстанавливалось сначала до низших оксидов, оксидов 2-валентного железа, а затем до чистого железа:



В реакцию восстановления железа вступал также и твердый углерод:



¹ Дмитриев А. Н., Шумаков Н. С., Леонтьев Л. И. Основы теории и технологии доменной плавки. — Екатеринбург: УрО РАН, 2005. — С. 10.

Таким образом, процесс получения железа из железных руд носит восстановительный характер.

Процесс горения древесного угля определялся естественным подсосом воздуха. Количество воздуха, поступающего через шлаковую лётку в горн, и следовательно, количество сжигаемого в единицу времени углерода было небольшим, что предопределяло невысокую интенсивность плавки и низкие температуры в нижней, наиболее горячей, части горна (1200–1250 °С). Процесс получения железа был малопроизводительным и малоэффективным — суточное производство составляло до 1,5 т, степень восстановления железа не превышала 50–60 %. Значительная часть железа оставалась невосстановленной в виде оксида 2-валентного железа (FeO). Оксид железа взаимодействовал с оксидами пустой породы, образуя шлак.

Шлак — это вступившие во взаимодействие оксиды пустой породы и невосстановленного железа.

Оксиды пустой породы — это, как правило, оксиды кремния и алюминия. Температура плавления данных оксидов значительна (SiO_2 —1728 °С; Al_2O_3 —2110 °С), но при взаимодействии этих тугоплавких оксидов с оксидом 2-валентного железа образуются легкоплавкие соединения. Таким образом, температура плавления шлака снижается, причем чем выше содержание FeO, тем температура плавления шлака ниже. Поэтому процесс удаления шлака, то есть процесс разделения рудного материала и пустой породы, был возможен при достаточно низких температурах. Часть расплавленного шлака вытекала через шлаковую лётку, скапливаясь в специальной яме перед горном.

Частицы восстановленного железа в процессе восстановления слипались и сваривались между собой на лещади горна, образуя пористый материал.

В печи в достатке имеется углерод, который хорошо растворяется в железе. Но здесь необходимо учитывать, что поры данного материала были пропитаны железистым шлаком, то есть шлаком с высоким содержанием оксида железа (чтобы шлак мог хотя бы частично расплавиться, содержание FeO должно составлять приблизительно 50 %). В присутствии большого количества невосстановленного железа, содержащегося в шлаке, восстановленное железо не могло науглеродиться. В сыродутных горнах происходило интенсивное обезуглероживание первоначально науглероженного губчатого железа железистым шлаком. Температура плавления чистого железа состав-

ляет 1539 °С. Температура в горне не превышала 1300 °С. Таким образом, продукт плавки — железо с низким содержанием углерода — находился в твердом виде, в виде губчатой массы, поры которой были заполнены полужидким шлаком.

Такой продукт плавки железных руд — губчатое железо — называется *крицей*.

После достижения крицей достаточно большого веса (нескольких пудов) ее извлекали из печи и проковывали. При этом шлак удалялся из пор, а металл сваривался. Данная технология позволяла получать малоуглеродистое железо (железо с низким содержанием углерода), которое хорошо ковалось.

Важный шаг в совершенствовании сыродутных горнов был сделан в VIII веке в Каталонии (Испания). Горн имел отдельную загрузку руды и древесного угля, специальную фурму для подачи дутья, лётку для выпуска шлака и наклонную переднюю стенку, позволяющую извлекать готовую крицу щипцами без остановки процесса (рис. 5). Впервые процесс стал непрерывным, что резко повысило производительность горнов.

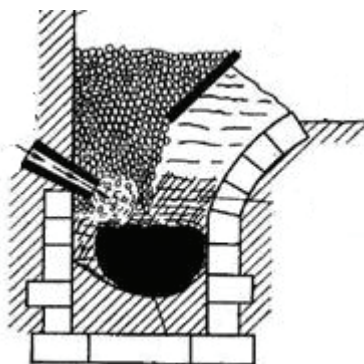


Рис. 5. Схема каталонского горна¹

Кроме того, в VIII веке был сделан важнейший шаг, направленный на использование принудительной подачи воздуха за счет применения воздуходушных устройств, приводимых в действие водяными двигателями. Увеличение мощности воздуходушных средств позволило увели-

¹ Дмитриев А. Н., Шумаков Н. С., Леонтьев Л. И. Основы теории и технологии доменной плавки. — Екатеринбург: УрО РАН, 2005. — С. 13.

чить высоту горнов. В более высоких печах наряду с основным продуктом — губчатым железом (крицей) — стали получать жидкий продукт. Принудительная подача дутья повлекла за собой повышение температуры в печи. Время пребывания материалов в печи также увеличилось. Опускающиеся материалы лучше прогревались и восстанавливались. Степень восстановления железа возросла до 80 %, соответственно в шлаке содержание FeO уменьшилось. Сложившиеся условия плавки привели к тому, что железо науглероживалось. Температура плавления сплавов железа с углеродом по мере увеличения содержания в них последнего снижается с 1539 (чистое железо) до 1147 °C (содержание углерода 4,3 %). Повышенные температуры в печи, с одной стороны, и снижение температуры плавления сплава железа, с другой стороны, приводили к появлению жидкого продукта плавки — чугуна.

Чугун — сплав железа с углеродом, содержание которого превышает 2,14 %.

В связи с тем что чугун отличается хрупкостью и не куется, первоначально его считали нежелательным отходом производства, которое загружали повторно в горн вместе с рудой. Английское название чугуна *pig iron* (свинское железо).

Металлургические печи, в которых стало возможным выплавлять из руд не только губчатое железо, но и чугун, получили название *домницы*.

Позже были изобретены эффективные способы окислительного передела чугуна в сталь — в сплав железа с меньшим содержанием углерода (до 2,14 %). Сначала для этого использовали окислительные кричные горны, а затем пудлинговые, мартеновские печи и кислородные конвертеры. Принципиальной разницей процессов получения чугуна и стали является то, что процесс получения чугуна является восстановительным процессом, а процесс получения стали — окислительным.

С XVIII века производство стали из чугуна приняло широкие масштабы. Основным агрегатом для получения чугуна стали доменные печи. Коренное отличие доменной печи от домницы заключается в том, что в домнице получали крицу и чугун, в доменной печи — только чугун.

Итак, на смену 1-ступенчатому способу получения железа (*руда — железо*) пришел 2-ступенчатый способ с чугуном в виде *промежуточного продукта передела (руда — чугун — сталь)*.

Двухступенчатый способ получения железа отличается:

- большой степенью извлечения железа из руды (до 100 %);

- большой экономичностью процесса (расход руды и выход шлака сократились в 1,5–2 раза);
- меньшим расходом топлива.

Дальнейшее развитие доменного производства сдерживалось использованием слабых воздуходувных средств, а также тем, что в качестве топлива и восстановителя в доменной печи использовали древесный уголь.

В середине XVIII века произошел качественный скачок в развитии техники получения чугуна. Вместо древесного угля стали использовать минеральное топливо — кокс, продукт пиролиза каменного угля. Создание мощных воздуходувных машин, связанное с развитием машиностроения, позволило увеличить производительность и размеры печей.

С этого времени 2-ступенчатая схема получения железа стала основной схемой переработки железных руд. Производство черных металлов осуществляется по двум основным технологическим схемам (рис. 6) — в кислородных конвертерах и в дуговых электросталеплавильных печах.

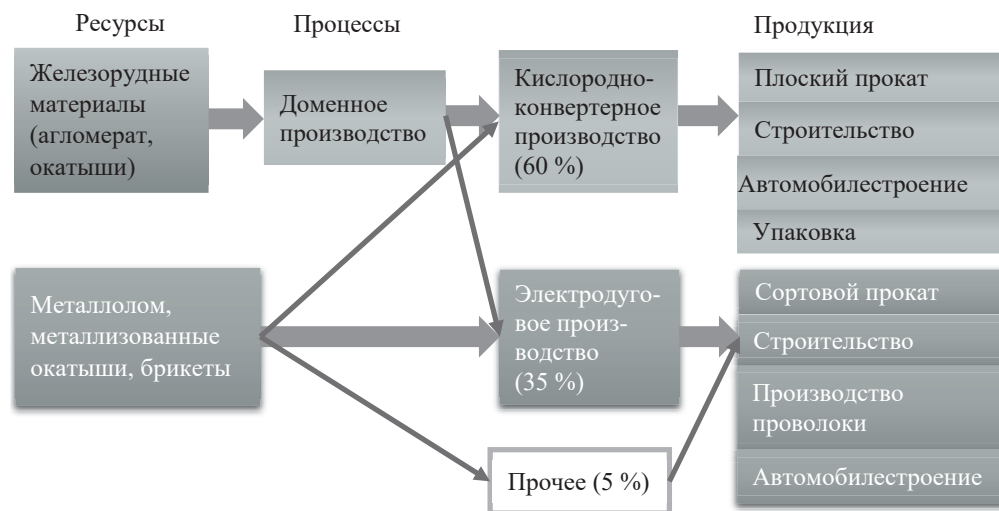


Рис. 6. Технологические схемы производства черных металлов

Схемы отличаются видом производимой продукции и используемой металлошихтой. В первой схеме основу металлошихты составляет чугун, выплавляемый в доменных печах, во второй схеме — металлолом, металлизированные окатыши или брикеты. На заводах с полным

циклом в металлошихте электропечей применяют до 30–40 % жидкого чугуна. К прочим процессам получения железа относятся так называемые процессы прямого получения железа, то есть получения железа (или его сплава с углеродом) в твердом виде непосредственно из руды или подготовленных железорудных материалов, минуя стадию чугуна.

На промышленный уровень вышли четыре технологии, а именно: Corex (ЮАР, Корея, Китай, Индия, суммарной производительностью более 5 млн т/год), Finex (Корея, производительностью 1,5 млн т/год) и Hismelt (Австралия, производительностью 0,8 млн т/год), Romelt (республике Мьянма, производительностью 0,3 млн т/год). Основным преимуществом новых технологий выплавки чугуна в сравнении с доменным процессом является радикальное сокращение расхода кокса на процесс (Corex, Finex) либо полный отказ от его использования (Hismelt, Romelt).

Двухступенчатая технологическая цепочка доменная печь — кислородный конвертер — машина непрерывного литья заготовок — прокатный стан остается главенствующей в мировом производстве черных металлов. Таким образом, и в XXI веке жидкий чугун остается основным и главным компонентом металлошихты при выплавке стали. Производство чугуна растет в соответствии с ростом производства стали. Отношение чугун/сталь составляет 0,71 в России и 0,70 в мире в целом. Руда и уголь продолжают быть основными сырьевыми материалами в металлургии железа.

Современная технология доменной плавки, ориентированная на снижение энергозатрат, повышение удельной производительности доменных печей, длительный период их эксплуатации без ремонтов и экологически чистое производство сформировалась как следствие:

- коксования каменного угля;
- совершенствования воздуходувных средств;
- использования нагретого дутья;
- развития конструкций как самой доменной печи, так и вспомогательного оборудования;
- производства окускованного сырья с высокими металлургическими свойствами (агломерат, окатыши);
- автоматизации и информатизации доменного процесса.

1. Технологическая схема получения чугуна в доменных печах

1.1. Комплекс доменной печи

Устройство доменной печи. Целью доменного производства является получение высококачественного чугуна (заданного состава с низким содержанием примесей) с наименьшими топливно-энергетическими затратами и максимальной (заданной) производительностью.

Требование минимальных топливно-энергетических запасов станет более очевидно при рассмотрении общей схемы доменного производства, объемов производства, расходов сырья на производство 1 тонны продукции и цен на сырье.

Основной продукт доменной плавки — чугун. Обычно чугун содержит 91–95 % Fe и 3,5–4,5 % C.

Основным агрегатом для получения чугуна из железных руд (ЖРМ) является доменная печь (см. рисунок на с. 16).

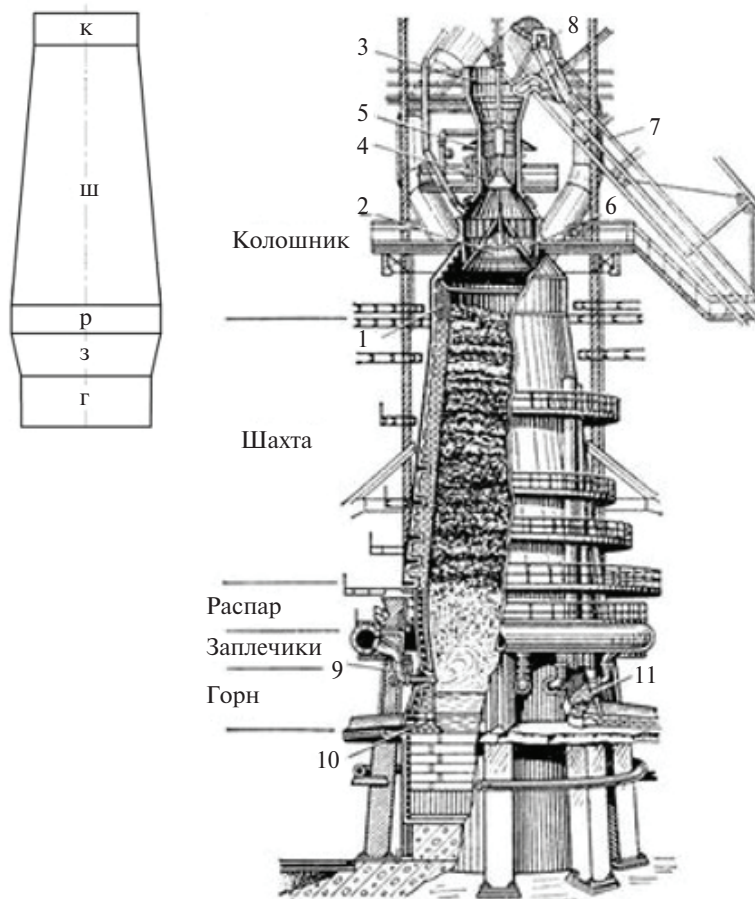
По принципу работы доменная печь относится к плавильным печам шахтного типа, печам, рабочее пространство которых вытянуто по вертикали, а горизонтальное сечение — окружность. Течение процессов в шахтных печах основано на противотоке материалов и горячих газов.

Очертание рабочего пространства печи в вертикальном осевом сечении, ограниченное футеровкой, называется профилем. Профиль печи в зависимости от их геометрического очертания и технологического назначения делится на пять частей (см. рисунок на с. 16).

Верхняя часть печи, имеющая цилиндрическую форму, называется колошником. Колошник доменной печи оборудован колошниковым устройством.

Колошниковое устройство представляет собой комплекс металлоконструкций различного назначения и включает в себя устройства для подачи и загрузки материалов в печь, газоотводы для равномер-

ного отвода газов из печи (не менее 4), устройства для производства ремонтных и монтажных работ.



Общий вид доменной печи¹:

1 — защитные сегменты колошника; 2 — большой конус; 3 — приемная воронка; 4 — малый конус; 5 — распределитель шихты; 6 — чаша большого конуса; 7 — наклонный мост; 8 — скип; 9 — воздушная фурма; 10 — чугунная лётка; 11 — шлаковая лётка; К — колошник; Ш — шахта; Р — распар; З — заплекники; Г — горн

Засыпной аппарат загрузочного устройства доменной печи служит для загрузки и распределения материалов в доменной печи. При этом он герметично закрывает печь и изолирует ее внутренне пространство

¹ Большая советская энциклопедия, БСЭ. — 2012. — Ст. «Доменное производство».

от атмосферы. Показаны элементы засыпного аппарата: большой конус, закрывающий чашу большого конуса; малый конус, закрывающий приемную воронку, и механизм, обеспечивающий распределение шихты по окружности; приемная воронка, в которую шихтовые материалы высыпают из скипа путем его опрокидывания, причем скип доставляют на колошник по рельсам наклонного моста.

Основной по объему частью печи является шахта, представляющая собой усеченный конус.

Наиболее широкая часть печи, имеющая форму цилиндра, — распар переходит в заплечики в форме обратного усеченного конуса.

Нижняя часть печи, имеющая форму цилиндра, называется горном. Горн в свою очередь подразделяется на верхний и нижний горн или фурменную зону и металлоприемник соответственно. В верхней части горна имеется большое число равномерно распределенных по окружности фурменных отверстий (15–40 в зависимости от объема печи), через которые из кольцевого воздухопровода, расположенного вокруг печи, через специальные приборы (фурмы) подают дутье. Нижний горн оборудован лётками — устройствами для выпуска продуктов плавки. Лётки для выпуска чугуна делают в стенке горна на уровне лещади (лещадью называют подину металлоприемника) в виде прямоугольных каналов размером 250–300×450–500 мм, в которых высверливают отверстия в углеродистой футеровке металлоприемника диаметром 50–60 мм. Количество леток зависит от объема печи и составляет от 1 до 4. Часть металлоприемника ниже чугунной лётки носит название зумпфа или «мертвого» слоя. Эта зона, заполненная жидким металлом, защищает лещадь от высокотемпературных процессов, протекающих в горне.

Выпускаемый из печи через лётки чугун поступает в располагаемые на рабочей площадке чугунные желоба и по ним — в чугуновозные ковши; выпускаемый из печи шлак по расположенным на площадке шлаковым желобам стекает в шлаковозные ковши либо на установки придоменной грануляции жидкого шлака.

Доменная печь снаружи заключена в металлический кожух, состоящий из ряда цилиндрических и конических поясов. Внутренняя часть печи выложена огнеупорным кирпичом, сохранность которого в течение нескольких лет эксплуатации обеспечивается системой охлаждения, прикрепленной к внутренней поверхности кожуха. Огнеупорная кладка (футеровка) служит для уменьшения тепловых потерь и предохранения кожуха печи от различных воздействий: температур-

ные напряжения, давление газов, шихты и жидких продуктов плавки, химическое воздействие, абразивное воздействие опускающихся шихтовых материалов и восходящего потока газа, несущего большое количество пыли, и т. п.

Печь опирается на фундамент — железобетонный армированный высотой до 10 м массив, рассчитанный на огромные нагрузки, большая часть которого заглублена в землю. Тяжесть кожуха и футеровки верхней части печи передается на фундамент через мораторное кольцо кожуха и колонны.

Конфигурация рабочего пространства сложилась в процессе совершенствования технологического агрегата и создает наиболее благоприятные условия для протекания аэродинамических и физико-химических процессов.

Размеры составных частей доменной печи определяют ее рабочее пространство, так называемый ее полезный объем. Полезный объем равен объему печи от оси чугунной лётки до засыпного устройства в его крайнем опущенном положении. Расстояние от этого уровня до оси чугунной лётки называется полезной высотой печи.

Параметры профиля печи: полезный объем печи и полезная высота печи, а также соотношения диаметров колошника, распара и горна определяют конфигурацию профиля печи и являются ее характеристикой. Размеры средней по объему доменной печи (2002 м³) приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Размеры средней по объему доменной печи (2002 м³)

Элементы профиля	Диаметр, м	Высота, м
Колошник	7,3	3,0
Шахта	—	18,1
Распар	10,9	3,0
Заплечики	—	1,7
Горн	9,8	3,7

Учитывая размеры колошниковоу устройства (до 15–18 м), можно представить, что доменная печь является очень серьезным сооружением высотой порядка 50 м.

В России самая большая доменная печь — ДП № 5 ЧерМК «Северянка», ее объем — 5580 м³, полезная высота — 33,5 м, диаметр распара — 16 м.

Современная доменная печь — это самый сложный технологический комплекс, включающий в себя непосредственно доменную печь, а также основное и вспомогательное оборудование, назначение которого определяется технологическими задачами доменного производства.

Шихтоподача. Для получения чугуна в доменную печь загружают шихту. Компоненты доменной шихты условно делят на 3 группы:

- железорудные материалы (ЖРМ) — руда, агломерат, окатыши, материалы, несущие в себе основную массу железа;
- флюсы — материалы для образования и расплавления шлака;
- твердое топливо — кокс.

В целях повышения содержания железа железные руды подвергают довольно сложной подготовке к плавке. Продуктами этой подготовки, в зависимости от схемы переработки, являются агломерат и окатыши. Доли этих компонентов в доменной шихте варьируются в широких пределах. Богатые кусковые железные руды становятся все более редкими и их качество все меньше удовлетворяет требованиям к доменной шихте.

Железорудные материалы, обычно используемые в доменном производстве, содержат 56–60 % железа. Их расход на получение 1 тонны чугуна можно оценить по балансу железа:

$$0,01M_{\text{ЖРМ}}\text{Fe}_{\text{ЖРМ}} = 0,01M_{\text{чуг}}[\text{Fe}],$$

$$R_{\text{ЖРМ}} = \frac{M_{\text{ЖРМ}}}{M_{\text{чуг}}} = \frac{[\text{Fe}]}{\text{Fe}_{\text{ЖРМ}}},$$

где $M_{\text{ЖРМ}}$, $\text{Fe}_{\text{ЖРМ}}$ — количество железорудных материалов, т, и содержание в нем железа, %, соответственно; $M_{\text{чуг}}$, $[\text{Fe}]$ — масса чугуна, т, и содержание в нем железа, %, соответственно; $R_{\text{ЖРМ}}$ — удельный расход железорудного материала, т/т.

С учетом того, что содержание железа в чугуне составляет 91–95 %, расход железорудных материалов составит

$$R_{\text{ЖРМ}} = \frac{91 \dots 95}{56 \dots 60} = 1,7 \dots 1,5.$$

Для получения чугуна из железорудных материалов необходимо выполнить две технологические задачи: отделить железо от кислорода и отделить восстановленное железо от пустой породы.

Первая задача решается путем восстановления железа из его оксидов, вторая задача — путем образования чугуна и шлака, их расплавления и дальнейшего разделения благодаря существенной разности в плотности материала.

Оксиды, входящие в состав пустой породы ЖРМ, имеют высокие температуры плавления (SiO_2 —1728 °С; Al_2O_3 —2110 °С) и даже в горне печи (средняя температура до 1600 °С) могут не расплавиться.

Для того чтобы снизить температуру плавления пустой породы, в доменную печь подаются флюсы — компоненты шихты, необходимые для процессов образования и расплавления шлака. В качестве флюсов, как правило, используют известняк, состоящий в основном из карбоната кальция (CaCO_3). Полученный в результате диссоциации карбоната кальция оксид кальция, взаимодействуя с оксидами пустой породы, образует легкоплавкие комплексные соединения. Температура плавления этих соединений не превышает 1350 °С.

Количество флюса, подаваемого в печь, зависит от состава пустой породы железорудных материалов и составляет до 0,4 т/т чуг.

Процессы разделения рудных материалов и пустой породы ЖРМ требуют высоких температур. Тепло, необходимое для получения таких температур, выделяется при сжигании твердого топлива и углеводородных добавок. При их горении образуется газообразный восстановитель — монооксид углерода и водород. Восстановитель и тепло, образующиеся при горении, необходимы также для решения и первой технологической задачи — отделения железа от кислорода.

Твердое топливо (кокс) — еще один компонент доменной шихты. Его расход составляет от 0,35—0,6 т/т чуг.

Таким образом, в целом, расход доменной шихты составляет 2,0—3,5 т/т чуг.

Производительность средней по объему доменной печи (2002 м³) составляет 5000 т чугуна в сутки. С учетом удельных расходов шихтовых материалов в доменную печь должно быть загружено от 12000 до 16500 т. Для сравнения: грузоподъемность одного железнодорожного вагона составляет 60 т. Таким образом, суточный расход шихтовых материалов на одной печи превышает 200 вагонов.

Доменные цеха России, как правило, имеют в своем составе более трех доменных печей. Это связано с тем, что меньшее количество печей может привести в случае остановки одной из печей к существенному снижению производства чугуна и перебоям в работе

других металлургических переделов. Умножим 200 вагонов на 3, получим 600 вагонов.

Взвешивание всей этой массы материалов, транспортировка их и загрузка на колошник возможны лишь при наличии мощного высокоавтоматизированного загрузочного оборудования. Хранение материалов осуществляется на шихтовом дворе, который также включает в себя специальное оборудование.

Таким образом, в комплекс доменной печи входят *устройства для хранения, дозирования и загрузки шихты на колошник доменной печи.*

Устройства для подачи дутья. Загруженные в печь материалы, опускаясь вниз, нагреваются и восстанавливаются поднимающимися из горна печи горячими газами. Горновые газы образуются в результате сжигания углерода топлива в горне печи. Для сжигания топлива сюда через *фурмы* из *кольцевого воздуховода* подается дутье — воздух, обогащенный кислородом, с углеводородными добавками.

Расход дутья составляет 4000–6000 м³/мин. Образующиеся при сжигании углерода горновые газы должны пройти слой материала, высота которого составляет 15–33 м. Поэтому воздух в доменную печь подается под избыточным давлением до 5 ати. Для этого доменная печь оснащается мощной *воздуходувной машиной.*

Важным шагом в развитии доменного процесса явился подогрев дутья. Он осуществляется в целях экономии дорогостоящего топлива — кокса. Температура нагрева воздуха составляет 1000–1350 °С. Для нагрева воздуха доменная печь оборудуется *воздухонагревателями.*

Воздухонагреватели представляют собой теплообменные аппараты для нагревания проходящего через них воздуха — сооружения до 40 метров высотой. Воздухонагреватели имеют периодичный режим работы. Сначала воздухонагреватель работает в режиме нагрева. Нагрев осуществляется за счет тепла газов, образующихся при сжигании подводимого в камеры горения воздухонагревателя очищенного доменного газа. После нагрева насадки воздухонагревателя он начинает работать на дутье. Следовательно, доменная печь должна быть оборудована 3 или, что еще лучше, 4 воздухонагревателями.

Крупным технологическим мероприятием, также направленным на снижение расхода кокса, явилось вдувание углеводородных добавок (пылеугольное топливо, природный газ, мазут). Расход природного газа составляет до 130 м³/т; пылеугольного топлива — до 200 кг/т.

Соотношение расходов углеводородных добавок определяется конкретной технологией.

Для интенсификации доменного процесса и увеличения концентрации газа-восстановителя используют дутье, обогащенное кислородом до 30 % (расход технического кислорода составляет $1,5\text{--}2\text{ м}^3/\text{мин}$).

Нагретый воздух, обогащенный кислородом, с углеводородными добавками, подаваемый под давлением называется комбинированным дутьем.

Литейный двор. Опускаясь вниз, шихтовые материалы нагреваются и восстанавливаются. Восстановленное железо науглероживается с образованием жидкого чугуна. Пустая порода, расплавляясь, образует жидкий шлак. Струйки и капли чугуна и шлака стекают в нижнюю часть горна. Вследствие большого различия в плотностях чугуна и шлака (плотность чугуна составляет $6\text{--}7\text{ т/м}^3$, шлака $2,3\text{--}2,8\text{ т/м}^3$) и нерастворимости друг в друге они расслаиваются.

Чугун скапливается в самом низу (на лещади) горна и периодически (от 8 до 24 раз в сутки) выпускается из печи лётки. Жидкий чугун, выпускаемый из доменной печи, по желобам заливается в чугуновозные ковши, в которых он перевозится либо в сталеплавильные цеха для производства стали, либо на *разливочные машины*, с помощью которых разливается в так называемые «чушки», отправляемые другим потребителям.

Вторым продуктом доменной плавки является шлак, выход которого в первую очередь определяется содержанием железа в загружаемых железорудных материалах и обычно составляет $350\text{--}400\text{ кг/т}$ чугуна. В процессе доменной плавки чугуна в количестве 5000 т ежедневно образуется $1500\text{--}2000\text{ т}$ шлака. При работе доменных печей с одной чугунной лёткой с большим выходом шлака часть его выпускается через специальные шлаковые лётки (верхний шлак), а оставшийся в горне шлак (нижний) выпускается вместе с чугуном и отделяется от него в главном желобе, направляясь по шлаковым желобам в шлаковозные ковши. При работе печей на богатом железорудном сырье и при наличии 2 и более чугунных леток шлак полностью выпускается совместно с чугуном через чугунные лётки.

Грануляция шлака. Огненно-жидкий шлак в шлаковозах направляется либо на шлаковый отвал, либо в цех шлакопереработки, где

из него производят различные строительные материалы (гранулированный шлак, шлаковату, шлаковую пемзу и т. д.). На доменных печах большого объема (более 3200 м^3) имеются *установки придоменной грануляции* выпускаемого из печи шлака, в которых шлак подвергается грануляции непосредственно на литейном дворе печи. В некоторых случаях шлак является целевым продуктом доменной плавки, а чугун — побочным. Так, например, при переработке в доменной печи железистых бокситов получают высокоглиноземистый шлак, используемый для производства специального высококачественного цемента.

Механизмы для обслуживания горна доменной печи, устройства для уборки продуктов плавки, технологический транспорт для перевозки продуктов плавки от доменной печи до пунктов разлива чугуна и шлака составляют оборудование литейного двора.

Газоочистка. Кроме чугуна и шлака, из доменной печи через систему газоотводов удаляется колошниковый газ (доменный газ), выход которого в 1,3–1,4 раза превышает расход дутья, подаваемого в доменную печь. Для доменной печи полезным объемом 2000 м^3 выход газа составляет $7000\text{--}8000 \text{ м}^3/\text{мин}$. Несмотря на низкую калорийность ($3700\text{--}4500 \text{ кДж/м}^3$), колошниковый газ является достаточно ценным продуктом благодаря тем объемам, в которых он производится. Он обеспечивает на 90 % всю энергетику предприятия, в том числе является топливом для нагрева воздухонагревателей доменной печи.

Использованию доменного газа в топливосжигающих устройствах мешает большая его запыленность (до 40 г/м^3). Очистка колошникового газа, осуществляемая в пылеуловителях, позволяет снизить содержание пыли до $0,005 \text{ г/м}^3$. Таким образом, колошниковый газ, пройдя систему сначала грубой, а затем тонкой очистки становится чище воздуха, которым мы дышим. *Пылеуловители* также входят в комплекс доменной печи.

Общая характеристика комплекса доменной печи. Доменная печь представляет собой сложнейшую технологическую управляемую систему, включающую также подсистему контроля и управления доменным процессом.

Важно отметить следующие основные характеристики доменной печи:

- является *восстановительным агрегатом*;

- является *непрерывно действующим агрегатом шахтного типа*;
- является *противоточным агрегатом* (течение процесса в доменной печи основано на противотоке шихтовых материалов и горячих газов; несмотря на кратковременность пребывания газов в печи, тепловой коэффициент их полезного действия равный 85–87 % является одним из лучших для металлургических объектов).

Такие показатели определяются противоточной природой тепловых и восстановительных процессов.

Современное доменное производство является практически безотходным — все его отходы потребляются либо в доменной печи, либо в смежных цехах. Так, колошниковая пыль, выносимая из печи газовым потоком, и мелочь железорудных материалов, отсеиваемая перед загрузкой их в печь, направляются на аглофабрику и после переработки возвращаются в доменный цех. Коксовая мелочь отгружается в качестве топлива другим потребителям. Скрап, образующийся в желобах при выпуске чугуна, на разливочных машинах и при ремонтах чугуновозных ковшей, поступает в доменную шихту в качестве металлодобавок.

Доменный цех своей основной продукцией связан практически со всеми цехами завода. В то же время он является потребителем продукции и услуг многих из них. Главная продукция доменного цеха — чугун — является исходным сырьем для всех переделных производств, поэтому успешная работа доменного цеха обеспечивает ритмичную работу всего предприятия и его экономическое благополучие. Этим обусловлено одно из ведущих мест доменного цеха в структуре металлургического предприятия.

1.2. Показатели работы доменной печи

Основными показателями, характеризующими работу доменной печи, являются ее суточная производительность и удельный расход кокса. Между собой они связаны зависимостью

$$P_{\text{сут}} = \frac{K_{\text{сут}}}{k}, \quad (1.1)$$

где $P_{\text{сут}}$ — суточная производительность печи, т/сут; $K_{\text{сут}}$ — суточный расход кокса; k — удельный расход кокса, т/т чугуна.

Поскольку производительность печи зависит от ее размеров, для сравнительной оценки работы доменных печей разного объема используют отношение суточного производства печи к полезному объему печи — удельную производительность печи (P_v , т/(сут·м³)):

$$P_v = \frac{P_{\text{сут}}}{V_0}. \quad (1.2)$$

Из записанных выше уравнений (1.1)—(1.2) можно получить соотношение

$$P_v = \frac{K_{\text{сут}}}{kV_0}, \quad (1.3)$$

или

$$P_v = \frac{J_k}{k}, \quad (1.4)$$

где J_k — индекс интенсивности доменной плавки по коксу (количество кокса, сожженного в сутки в 1 м³ объема печи, т/(сут·м³)),

$$J_k = \frac{K_{\text{сут}}}{V_0}. \quad (1.5)$$

Из этих уравнений (1.3)—(1.5) видно, что чем больше кокса сгорает в единице объема печи в сутки и чем меньше удельный расход кокса, тем выше интенсивность ее работы, тем выше производительность печи.

При оценке влияния удельного расхода кокса на показатели работы печи необходимо иметь в виду, что сам по себе удельный расход кокса является чрезвычайно важным показателем, характеризующим экономичность доменного процесса. Стоимость кокса в себестоимости чугуна составляет примерно половину.

При сравнительном анализе работы доменных печей по удельному расходу кокса необходимо учитывать, что основными источниками энергии в доменной печи наряду с горячим дутьем и коксом являются углеводородные добавки: пылеугольное топливо, природный газ, мазут. Современная тенденция по сокращению расхода удельного расхода кокса направлена на увеличение расходов углеводородных добавок. В данном случае при оценке экономичности процесса необходимо учитывать суммарный расход углерода, включая все его источники.

1.3. Доменные чугуны

Чугун — это сплав железа с углеродом, содержащий, кроме того, другие элементы (кремний, марганец, серу, фосфор, иногда хром, никель, титан, ванадий, медь, мышьяк, кобальт и др.).

Содержание одних примесей в чугуне определяется составом шихтовых материалов, то есть зависит от их количества, вносимого шихтовыми материалами. Это касается марганца, фосфора, хрома, никеля. Содержание других примесей в чугуне зависит от температурного и шлакового режима работы печи. Это касается, прежде всего, кремния, титана. Содержание серы определяется их количеством в шихтовых материалах, а также зависит от условий протекания процесса.

Таким образом, меняя температурные условия протекания процесса и состав шихтовых материалов, можно обеспечить получение чугуна заданного состава.

Требования, предъявляемые к составу чугуна (содержанию примесей), определяются его назначением. По своему назначению чугуны делятся на перекдельные, литейные и специальные.

Основное количество чугунов, выплавляемых в доменных печах, относится к перекдельным чугунам, то есть чугунам, используемым для перекдела в сталь.

Литейные чугуны являются готовым продуктом.

Специальные чугуны (доменные ферросплавы) используются в качестве добавок разного назначения в сталеплавильном процессе.

Перекдельные чугуны. В зависимости от содержания кремния в чугуне различают следующие марки чугуна:

- П1, П2 — перекдельные чугуны;
- ПЛ1, ПЛ2 — перекдельные чугуны для литейного производства;
- ПФ1, ПФ2, ПФ3 — перекдельные фосфористые чугуны;
- ПВК1, ПВК2, ПВК3 — перекдельные высококачественные чугуны.

Кроме того, в зависимости от содержания марганца различают 4 группы чугунов, от содержания фосфора — 3 класса, серы — 5 категорий. Полная характеристика химического состава чугуна включает в себя название марки, группы, класса и категории. ГОСТы на чугун приведены в приложении.

Рассмотрим химический состав перепельного чугуна среднего качества, %:

Si.....	0,2—0,9
Mn.....	0,5—1,5
P.....	до 0,3
S.....	до 0,05

Оценивая в целом химический состав перепельного чугуна, необходимо отметить следующее. Перепельные чугуны предназначены для дальнейшего передела чугуна в сталь. Поэтому химический состав чугуна определяется требованиями, особенностями сталеплавильного процесса.

Сталеплавильный процесс является окислительным процессом, в таких условиях удаление серы из металла затруднено. Поэтому одна из главных задач доменной плавки — получение чугуна с минимальным содержанием серы.

Характерной особенностью химического состава всех перепельных чугунов является низкое содержание серы.

В зависимости от способа передела чугуна в сталь предъявляются различные требования к содержанию в чугуне других элементов.

Переработка чугуна в кислородных конвертерах позволяет удалять фосфор, придающий металлу хладноломкость (трещины на морозе). Фосфор в сталеплавильном процессе используется в качестве дополнительного источника тепла при его окислении выделяется тепло. Для удаления фосфора необходимо вводить основные шлаки, то есть шлаки с повышенным содержанием основных оксидов и, следовательно, пониженным содержанием кислых оксидов, в данном случае оксидов кремния. Таким образом, переработка чугуна в кислородных конвертерах требует низкого содержания кремния.

Содержание марганца в перепельных чугунах не лимитируется. Марганец способствует процессам удаления серы.

Перепельные чугуны для литейного производства характеризуются повышенным содержанием кремния (до 1,2 %). Перепельные фосфористые чугуны отличаются повышенным содержанием кремния (до 1,2 %) и высоким содержанием фосфора (до 2 %). Перепельные высококачественные чугуны имеют низкое содержание таких примесей, как сера и фосфор (S до 0,025 %, P до 0,05 %).

Литейные чугуны. Литейные чугуны являются готовым продуктом и используются для получения чугунных отливок.

В зависимости от содержания кремния в литейном чугуне различают 6 марок чугуна Л1—Л6 (см. приложение).

Характеризуя в целом химический состав литейных чугунов, следует отметить высокое содержание в них кремния, %:

Si.....	1,2—3,6
Mn	0,3—1,5
P	0,08—1,2
S.....	0,02—0,05

При производстве чугунных отливок очень важно получить высокие механические свойства металла, в частности высокую стойкость против ударных нагрузок. Механические свойства чугуна получаются высокими в том случае, когда углерод в чугуне находится в виде мелкодисперсного графита.

Возможны две формы существования углерода в металле — в виде графита (С) и цементита (карбида железа Fe_3C). Выделению углерода в виде графита способствует повышенное содержание кремния в чугуне. Степень же дисперсности его выделения зависит, с одной стороны, от скорости охлаждения отливок, а с другой стороны, от содержания кремния. Поэтому литейные чугуны отличаются высоким содержанием кремния и широким диапазоном его изменения.

Марганец способствует образованию в чугуне карбида железа — цементита (Fe_3C). Образование цементита приводит к снижению его механической прочности, к увеличению хрупкости, поэтому в литейном чугуне содержание марганца ограничивают.

Реальные структуры чугуна содержат и графит, и цементит. Чугун, в котором много цементита, называют белым чугуном, чугун с большим содержанием пластинчатого графита — серым чугуном.

Для получения качественных отливок содержание фосфора не должно превышать 0,08 %. Однако в связи с тем, что фосфор повышает жидкоподвижность чугуна и, следовательно, фосфористый чугун лучше заполняет форму, для производства неотчетливых отливок сложной формы содержание фосфора может быть повышено (художественное литье).

Сера придает чугуну красноломкость и при затвердевании отливок вызывает появление трещин. Поэтому в литейном чугуне содержание серы ограничивают 0,02 %.

Специальные чугуны. Специальные чугуны, или доменные ферросплавы, используются в качестве легирующих добавок в сталеплавильном производстве и отличаются высоким содержанием отдельных компонентов: ферросилиций — кремния, зеркальный чугун и ферромарганец — марганца (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Компоненты специальных чугунов

Вид ферросплава	Si, %	Mn, %	P, %	S, %
Ферросилиций	9–13	Не более 3	До 0,2	До 0,04
Зеркальный чугун	До 2	10–25	До 0,18	До 0,03
Ферромарганец	До 2	75	До 0,45	До 0,35

Контрольные вопросы к главе 1

1. Что такое железная руда, содержание железа в богатой руде?
2. За счет каких процессов осуществляется извлечение железа из железных руд?
3. Что является целью доменного производства?
4. Нарисуйте профиль доменной печи. Назовите основные элементы профиля.
5. Какие материалы входят в состав доменной шихты? Назовите примерное количество материалов для получения 1 тонны чугуна.
6. Назовите параметры комбинированного дутья.
7. Что такое чугун? Каков примерный состав передельного чугуна?
8. Назовите основные показатели работы доменной печи.
9. Чем отличаются по составу передельные и литейные чугуны?

2. Доменный процесс

2.1. Общая характеристика доменного процесса

Доменный процесс — это процесс восстановления оксидов железа, разделения металла и шлака в агрегате шахтного типа за счет тепла и восстановительного потенциала газового потока, образующегося при горении топлива на фурмах.

Эволюционное развитие доменного процесса в течение нескольких веков привело к замечательным результатам. По эффективности использования энергии современный доменный процесс не находит себе равных в металлургии, а доменная печь имеет уникальную производительность, которая за время эволюции увеличилась в тысячи раз.

Для успешного управления работой такого агрегата необходимы глубокие знания всего комплекса сложных взаимосвязанных процессов, протекающих в рабочем пространстве доменной печи, а также сведения о всей технологии получения чугуна. Схема процессов, происходящих в доменной печи, показана на рис. 2.1.

Приведенная ниже общая характеристика доменного процесса дана в последовательности, соответствующей работе восстановительного газа в печи от момента его образования перед воздушными фурмами до выхода из столба шихтовых материалов.

Важнейшей функцией поднимающегося потока газов является нагрев опускающихся шихтовых материалов. В результате теплообмена температура газов уменьшается. Приведенная схема распределения температур по высоте печи составляет основу для дальнейших рассуждений о характере и месте протекания различных реакций. Схема на рис. 2.1 неоднократно используется в ходе анализа процессов.

Процессы в фурменной зоне. Горячее дутье подается в доменную печь через 15—40 воздушных фурм, равномерно расположенных по окружности в верхней части горна. Дутье выходит из фурм со скоростью 200—300 м/с и при давлении 2—5 ати, которое необходимо для

того, чтобы пройти через столб шихтовых материалов при наличии повышенного давления на колошнике.

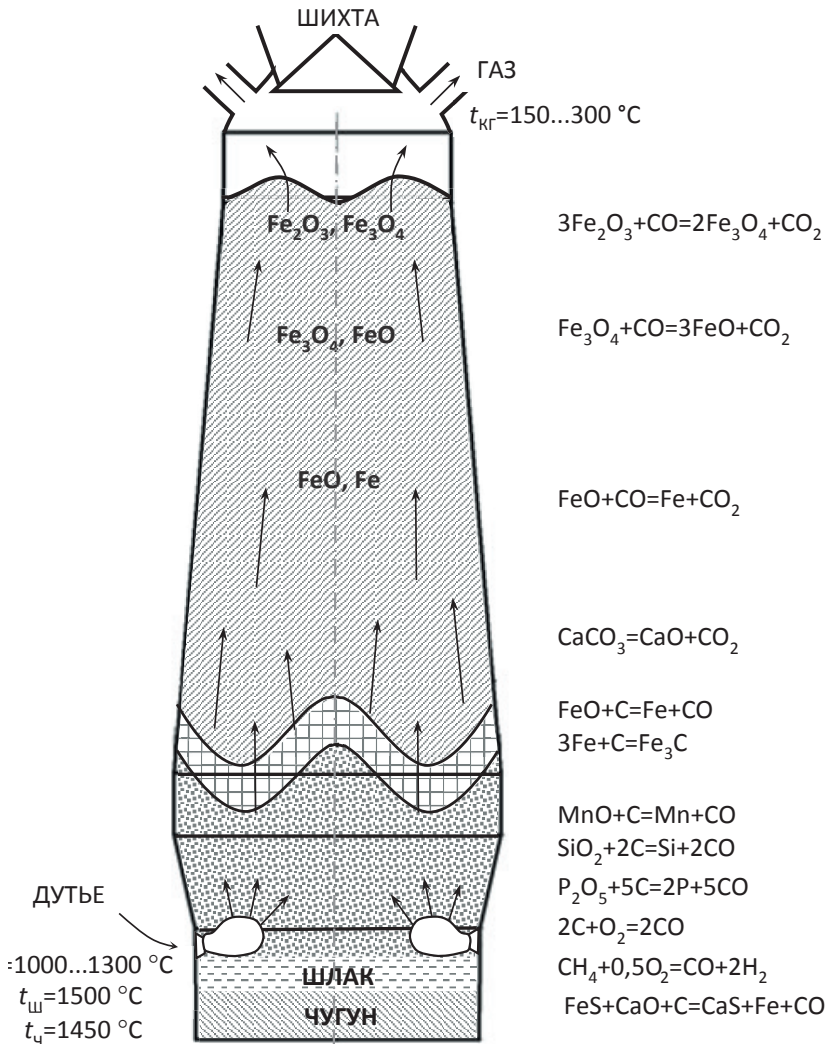


Рис. 2.1. Схема процессов, происходящих в доменной печи

Высокая скорость истечения дутья из фурм способствует образованию перед каждой фурмой зоны циркуляции кокса. Протяженность зон циркуляции составляет от 1 до 2 м. Спереди, с боков и снизу зоны циркуляции ограничены довольно плотным слоем из кусков кокса, которые не сгорели при опускании в печь. Слой кокса в домен-

ной печи заполняет весь горн и, вероятно, достигает кладки лещади, образуя «коксовую насадку».

Сверху зоны циркуляции также ограничены слоем кокса, который упакован менее плотно из-за высокой скорости газа, поднимающегося из зон циркуляции между кусками кокса. Нижние куски кокса данного слоя периодически поступают в зоны циркуляции и сгорают в струе дутья. В результате происходит постепенное опускание всего слоя кокса, на место которого непрерывно поступают новые порции кокса из вышележащих слоев.

Основным физико-химическим процессом здесь является процесс формирования горячих восстановительных газов и процесс передачи тепла от поднимающегося вверх потока газов к опускающимся кускам кокса и каплям чугуна и шлака.

Процессы в горне, заплечиках. Единственным твердым материалом в горне печи и заплечиках является кокс. Жидкие чугун и шлак фильтруются через слой кокса и накапливаются в нижней части горна, откуда периодически или непрерывно выпускаются.

Во время фильтрации жидких чугуна и шлака через слой коксовой насадки завершается процесс восстановления, чугун насыщается углеродом, происходит частичное восстановление марганца, кремния, фосфора из их оксидов и растворение этих элементов в чугуне.

Зона плавления. Слой разрыхленного кокса над зонами циркуляции ограничен сверху зоной плавления, состоящей из чередующихся слоев пустой породы, флюса и железа. Слоистая структура зоны плавления определяется соответствующим режимом загрузки шихтовых материалов в печь.

Зона плавления W-образной формы играет важную роль в работе доменной печи. Во-первых, данная зона благодаря давлению газа под ней поддерживает расположенный выше столб шихтовых материалов, во-вторых, слои кокса в зоне плавления обеспечивают радиальное распределение восстановительного газа по сечению доменной печи. Действие последнего фактора обусловлено тем, что слои размягченных и частично расплавленных железорудных материалов являются практически непроницаемыми для газового потока. В результате, для того чтобы подняться вверх к колошнику, газ должен пройти через горизонтальные «коксовые щели (коксовые окна)» в зоне плавления.

ления. Кокс должен обеспечивать минимально возможное сопротивление проходу газа, тем самым обуславливая повышение требований к прочности кокса, который должен хорошо сопротивляться истирающим и раздавливающим нагрузкам при опускании его в печи до зоны плавления, чтобы сохранить необходимые размеры кусков.

Основным физическим процессом в рассматриваемой зоне является плавление металла и шлака за счет тепла поднимающегося горнового газа.

Восстановительные процессы над зоной плавления. В зоне плавления железорудный материал представлен в основном металлическим железом. Непосредственно над этой зоной шихта содержит твердые оксиды двухвалентного железа (FeO). В этом месте шихта состоит из чередующихся слоев кокса и слоев, содержащих твердые оксиды.

Восстановительный газ поступает сюда непосредственно из слоя коксовой насадки, расположенной ниже зоны плавления, поэтому углеродсодержащим компонентом газа является монооксид углерода CO .

В зоне смешанной шихты протекает эндотермическая реакция прямого восстановления FeO , что служит причиной быстрого охлаждения поднимающегося потока газов. По мере дальнейшего подъема газа выше изотермы $900\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ реакция прямого восстановления оксидов железа завершается, однако монооксид углерода продолжает реагировать с оксидами железа по реакциям косвенного восстановления. Реакция косвенного восстановления экзотермична, в результате чего газы не охлаждаются при своем движении вверх в пределах этой зоны.

Восстановление высших оксидов. По мере продвижения вверх содержание CO в газе уменьшается, и он в значительной мере теряет способность восстанавливать железо из вюститита. Вместе с тем восстановительного потенциала газа достаточно, чтобы восстанавливать высшие оксиды железа — магнетит и гематит, находящиеся на верхних горизонтах печи.

Скорости движения газа в доменной печи достигают до $30\text{--}60\text{ м/с}$. Следовательно, время пребывания газа в печи составляет $\sim 1\text{ с}$. Поэтому для повышения эффективности работы доменной печи необходимо обеспечивать его хороший контакт с твердыми материалами для достижения высоких скоростей реакций восстановления.

В отличие от скорости газа скорость движения шихтовых материалов в печи значительно меньше. Среднее время их пребывания составляет 5–8 ч. Таким образом, имеется достаточно времени для реагирования с газом каждой частицы железорудного материала.

Обобщая вышесказанное, можно отметить, что доменный процесс — это совокупность сложных взаимосвязанных механических, газо- и гидродинамических, химических, теплофизических и физико-химических процессов, важнейшими из которых являются процессы восстановления оксидов железа, образования чугуна и шлака.

2.2. Восстановление оксидов железа

Термодинамика восстановления оксидов железа. Железо образует с кислородом 3 стабильных соединения:

- FeO — вюстит;
- Fe₂O₃ — гематит;
- Fe₃O₄ — магнетит.

Чистый магнетит содержит 31 % FeO и 69 % Fe₂O₃, можно встретить и такую химическую формулу магнетита — FeO · Fe₂O₃. Однако магнетит не является твердым раствором двух оксидов, а имеет собственную кристаллическую решетку типа шпинели, обеспечивающую его магнитные свойства.

Рассмотрим термодинамические области устойчивости оксидов железа. Прочность оксида определяется химическим сродством элемента к кислороду и характеризуется упругостью диссоциации оксида — равновесным парциальным давлением кислорода над поверхностью оксида. Чем выше сродство элемента к кислороду, то есть чем прочнее оксид, тем более низкой будет упругость диссоциации оксида.

В системе координат «Температура — Логарифм парциального давления кислорода» термодинамические области устойчивости оксидов железа ограничены практически прямыми линиями, которые характеризуют условия равновесия соответствующих фаз (рис. 2.2).

С повышением температуры парциальное давление кислорода над поверхностью оксида растет, то есть прочность оксидов железа снижается.

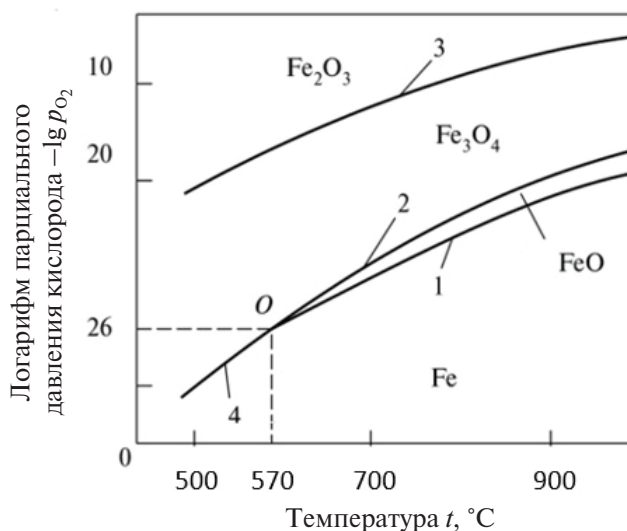


Рис. 2.2. Зависимость парциального давления кислорода от температуры¹:

1 — FeO; 2 — Fe₃O₄ при $t > 570$ °C; 3 — Fe₂O₃; 4 — Fe₃O₄ при $t < 570$ °C

При температурах выше 570 °C прочность оксидов повышается в обычной последовательности — от высших к низшим. При температурах ниже 570 °C прочность FeO становится ниже прочности Fe₃O₄, и FeO распадается на Fe₃O₄ и Fe.

При нормальных условиях в присутствии кислорода ($\lg(p_{O_2})=1,3$) устойчивой фазой является оксид 3-валентного железа, поэтому железные руды содержат в основном Fe₂O₃.

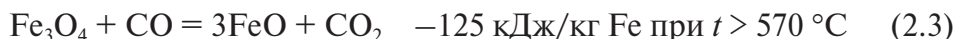
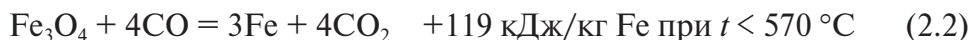
Процесс восстановления оксидов железа протекает по принципу Байкова — последовательности превращений от высшего оксида к низшим через все устойчивые оксиды, характерные для данных условий:

- при $t > 570$ °C $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ (три стадии);
- при $t < 570$ °C $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}$ (две стадии).

Восстановителем может быть элемент или соединение, обладающее большим сродством к кислороду, чем элемент, оксид которого восстанавливается. В доменной печи восстановителями являются монооксид углерода, углерод и водород, имеющие сравнительно высокое сродство к кислороду.

¹ Дмитриев А. Н., Шумаков Н. С., Леонтьев Л. И. Основы теории и технологии доменной плавки. — Екатеринбург: УрО РАН, 2005. — С. 59.

Уравнения химических реакций восстановления оксидов железа монооксидом углерода:



Реакция (2.1). Оксид 3-валентного железа — соединение непрочное (см. упругость диссоциации). Реакция идет слева направо при любом содержании в газовой фазе CO и CO₂ до полного израсходования одного из реагентов (возможна даже термическая диссоциация).

Реакции (2.2) и (2.3). Оксид Fe₃O₄ более прочный. Для его восстановления необходим избыток CO в газовой фазе. В противном случае CO₂ окисляет FeO до Fe₃O₄. Для протекания реакций отношение CO/CO₂ не должно быть меньше определенных значений.

Реакция (2.4). FeO является самым прочным оксидом железа. Для протекания прямой реакции необходим еще больший избыток CO и большее отношение CO/CO₂ в газовой фазе. Отсюда следует, что для каждого оксида при данной температуре существует такое отношение восстановителя и его оксида (CO/CO₂) в газовой фазе, при котором газовая фаза является нейтральной по отношению к оксиду железа и продукту его восстановления, а восстановительно-окислительная реакция находится в подвижном равновесии.

Поскольку объем газообразных продуктов реакции равен объему газа, вступающему в реакцию, состав равновесной газовой фазы не зависит от давления и меняется только с изменением температуры.

Равновесные соотношения CO/CO₂ в газовой фазе установлены расчетным путем в соответствии с законами химической термодинамики и подтверждены экспериментально. Равновесные составы газовой фазы с оксидами железа и железом для рассмотренных реакций при разных температурах могут быть представлены следующей диаграммой (рис. 2.3).

По оси ординат отложено содержание монооксида углерода (принято, что газовая фаза состоит из монооксида углерода и углекислого газа, поэтому в каждой точке ординаты сумма CO₂ и CO равна 100 %, а по оси абсцисс — температуры.

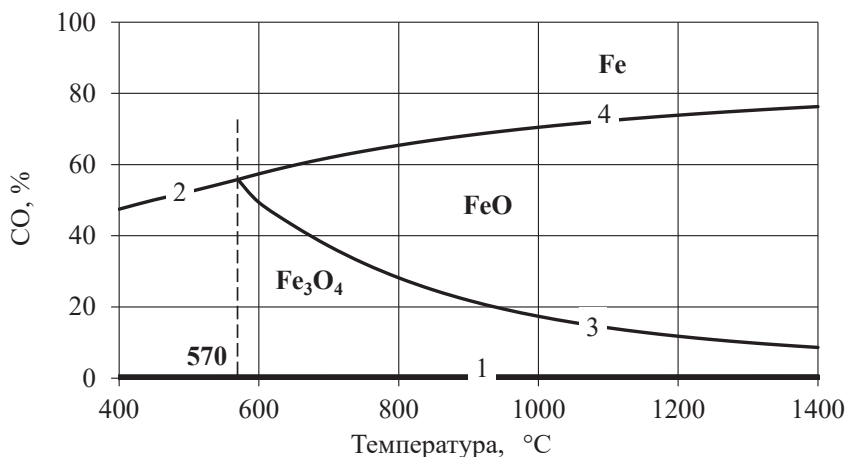
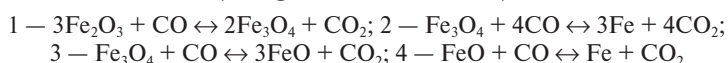


Рис. 2.3. Равновесный состав газовой фазы с железом и его оксидами (диаграмма Fe — O — C):



Равновесный состав газовой фазы реакции (2.1), необратимо протекающей при незначительном содержании CO, практически соответствует при любой температуре 100 % CO₂ в газовой фазе. Поэтому линия равновесия этой реакции (2.1) практически совпадает с осью абсцисс. Равновесный состав газовой фазы реакции (2.2) с изменением температуры меняется по кривой 2. Равновесные составы газовой фазы реакций (2.3) и (2.4) изменяются соответственно по кривым 3 и 4. Причем кривая 3 нисходящая, а кривая 4 восходящая, что объясняется эндотермичностью реакции (2.3) и экзотермичностью реакции (2.4).

Повышение температуры в соответствии с принципом Ле Шателье смещает равновесие эндотермической реакции в сторону поглощения тепла, вызывает увеличение содержания CO₂ и снижение содержания CO в газовой фазе (кривая 3 нисходящая). Равновесие экзотермической реакции с повышением температуры сдвигается, наоборот, в сторону выделения тепла, увеличения содержания CO и уменьшения содержания CO₂ в равновесной газовой фазе (кривая 4 восходящая).

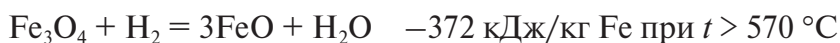
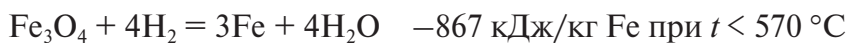
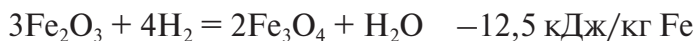
Таким образом, каждая точка на кривой характеризует равновесие одной из реакций восстановления. Равновесные кривые делят диаграмму на три области устойчивых состояний — Fe₃O₄, FeO и Fe.

При температурах ниже 570 °С область FeO исчезает, происходит восстановление Fe непосредственно из Fe₃O₄. Любая точка вне кривых 2—4 характеризует нейтральный состав газовой смеси при данной температуре по отношению к тому веществу (оксиду или железу), которое устойчиво в области расположения точки. Оно не будет ни восстанавливаться, ни окисляться. Для других веществ состав газа неравновесный, поэтому реакции пойдут в направлении образования того вещества, которое определяет название данной области. Например, если в газ, содержащий 40 % CO₂ и 60 % CO, при температуре 900 °С поместить Fe, FeO и Fe₃O₄, то без изменения останется только FeO. Оксид Fe₃O₄ будет восстанавливаться до FeO, а Fe — окисляться до FeO до тех пор, пока не закончатся реагенты или состав газовой фазы не станет равновесным для данной реакции.

Анализ кривых равновесия реакций позволяет сделать следующие выводы:

- для восстановления гематита достаточно невысокое содержание газа восстановителя;
- восстановление FeO возможно лишь при высокой концентрации CO в газовой фазе, причем с повышением температуры величина необходимого избытка восстановителя увеличивается;
- газ, который не может быть использован для восстановления FeO, используется для восстановления Fe₃O₄ до FeO.

Восстановление оксидов железа водородом протекает также по двум схемам: в две стадии при температурах ниже 570 °С и в три стадии при температурах выше 570 °С. Реакции восстановления оксидов железа водородом подобны реакциям восстановления оксидов углерода:



На рис. 2.4 приведена диаграмма равновесных газовых смесей H₂ и H₂O_{пар} с оксидами железа и железом.

Тепловые эффекты реакций отрицательные — все линии нисходящие.

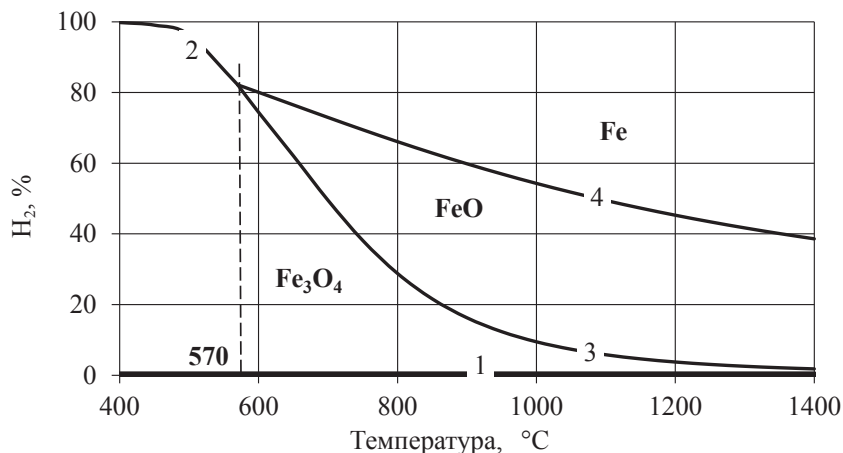
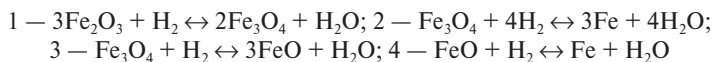


Рис. 2.4. Равновесный состав газовой фазы с железом и его оксидами (диаграмма Fe — O — H_2):



Сравнивая условия термодинамического равновесия процессов восстановления железа монооксидом углерода и водородом (рис. 2.5), следует отметить:

- при температуре 810 $^{\circ}C$ в равновесных газовых фазах с Fe_3O_4 , FeO и Fe устанавливается одинаковое соотношение газов — восстановителей и его оксидов, то есть оксид углерода и водород при температуре 810 $^{\circ}C$ обладают одинаковым средством к кислороду, одинакова их восстановительная способность. При температурах ниже 810 $^{\circ}C$ водород как восстановитель слабее монооксида углерода (для протекания восстановительного процесса при одних и тех же температурах доля водорода в газовой фазе должна быть выше, чем доля монооксида углерода);
- при температурах выше 810 $^{\circ}C$ водород становится более сильным восстановителем.

Водород восстанавливает оксиды железа быстрее, чем монооксид углерода. Это объясняется тем, что молекулы водорода быстрее диффундируют к поверхности невосстановленного оксида (через слой продуктов восстановления и примыкающую к куску пленку газа) и лучше адсорбируются в ней, чем CO.

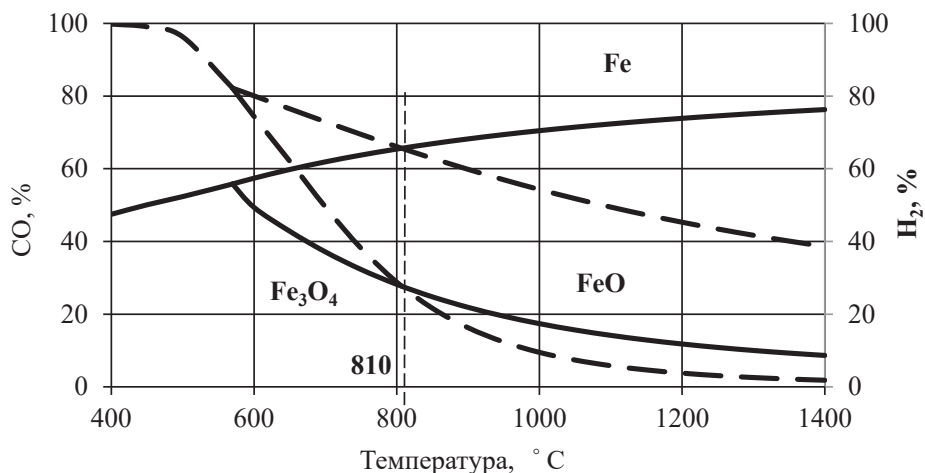
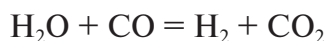
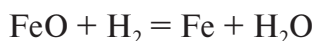


Рис. 2.5. Сопоставление равновесных составов газовой фазы с железом и его оксидами

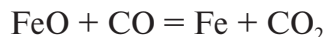
Кроме того, образующиеся при восстановлении пары воды реагируют с монооксидом углерода с образованием водорода:



Образовавшийся водород может вновь принять участие в восстановлении. Таким образом, водород существенно ускоряет процесс восстановления оксидов железа, выполняя роль посредника в передаче кислорода от оксидов железа к монооксиду углерода:



Суммарная реакция выглядит следующим образом:



Механизм и кинетика восстановления оксидов железа. Протекание реакций восстановления в доменной печи определяется не только термодинамическими закономерностями, но и закономерностями кинетики. Скорости реакций восстановления оксидов железа газообразными восстановителями оказывают существенное влияние на показатели работы доменной печи. Чтобы говорить о скорости реакций, необходимо знать механизм протекания этих реакций.

Для объяснения механизма процессов восстановления общепринятой является адсорбционно-автокаталитическая теория, предложенная Г. И. Чуфаровым. По этой теории соединение восстановителя с кислородом происходит не в газовой фазе, а на поверхности и внутри, в порах, куска твердого вещества, то есть на границе фаз оксид — газ. Согласно данной теории собственно химический акт реакции восстановления металлов газами состоит из трех последовательных стадий:

- адсорбция газа-восстановителя на поверхности восстанавливаемого твердого оксида (реакционной поверхности);
- отрыв кислорода от решетки оксида и соединение его с адсорбированными молекулами газа-восстановителя, в результате чего происходит образование оксида восстановителя и перестройка кристаллической решетки оксида металла в кристаллическую решетку металла, в результате чего образуется новая твердая фаза;
- десорбция газообразных продуктов восстановления в газовую фазу.

Длительность восстановительного процесса определяется протеканием самого медленного звена, которым обычно является вторая стадия, связанная с перестройкой кристаллической решетки.

Автокаталитический характер процесса восстановления проявляется в том, что скорость реакции в кинетической области (вторая стадия) изменяется во времени. С ростом числа зародышей новой фазы и увеличением реакционной поверхности скорость реакции резко возрастает. При этом химическая реакция ускоряется под действием катализатора — свежевосстановленного железа, а иногда и оксидов железа. При сливании отдельных поверхностей раздела фаз в одну фазу, которая по ходу процесса уменьшается в размерах, происходит постепенное убывание скорости реакции.

Скорость реакции восстановления зависит не только от скорости кристаллохимического превращения на реакционной поверхности (оксида), но и от подвода за счет диффузии газа-восстановителя к реакционной зоне и отвода продуктов реакции в газовую среду. В куске или слое рудного материала образующийся наружный слой восстановленного металла или низшего оксида оказывает существенное влияние на скорость диффузии. Чем больше толщина данного слоя, тем в большей степени затруднена диффузия.

Температура влияет на константу скорости химической реакции и на коэффициент диффузии. Согласно уравнению Аррениуса константа скорости химической реакции зависит от температуры экспоненциально:

$$K_v = Ae^{-\frac{E}{RT}},$$

а коэффициент диффузии зависит от температуры следующим образом:

$$D = D_0 T^n,$$

где A — предэкспоненциальный множитель; e — основание натурального логарифма; E — энергия активации (величина, определяющая минимальный запас энергии в частицах, необходимый для начала реакции); R — газовая постоянная; T — температура; n — постоянная величина, равная 1,5–2,0; D_0 — постоянная.

С повышением температуры константа скорости реакции (K_v) возрастает в большей степени, чем коэффициент диффузии, то есть лимитирующим процессом становится диффузия. Следовательно, процесс, находящийся в кинетической области при низких температурах, при возрастании температуры может перейти в диффузионную область (рис. 2.6).

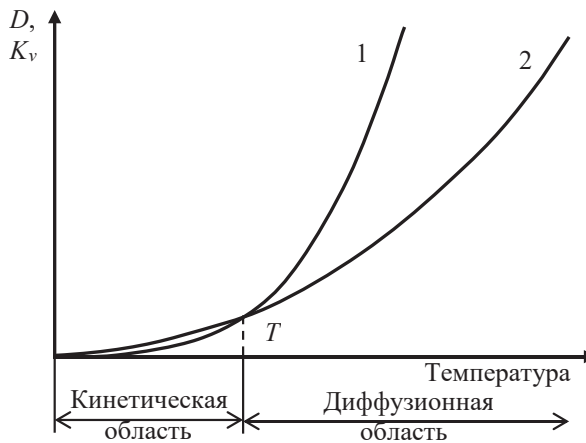


Рис. 2.6. Зависимость от температуры:

1 — константы скорости реакции K_v ; 2 — коэффициента диффузии D

Диффузия может быть внутренняя и внешняя. При внутренней диффузии имеет место движение ионов или восстановительного газа

и газообразных продуктов реакции восстановления через слой исходного или восстановленного твердого вещества, зависящее от свойств твердых веществ (исходных оксидов или продуктов реакции).

Скорость данного этапа восстановительного процесса зависит от соотношения между диаметром мельчайших каналов, образуемых порами исходного материала и восстановленного вещества, и длиной свободного пробега молекул, а также от физического взаимодействия между молекулами газа и поверхностями пор и каналов.

В кинетической области в связи с низкой скоростью реакции восстановительный процесс протекает по всей массе вещества. Процессы подвода газа-восстановителя к реакционной поверхности и отвод от нее продуктов реакции затруднен. В диффузионной области скорость реакции в сравнении с коэффициентом диффузии возрастает настолько, что процесс протекает по мере подвода газа-восстановителя и отвода продуктов реакции.

Закономерности восстановления оксидов железа в доменной печи. Оксиды железа относятся к категории относительно легко восстанавливаемых. Железорудные материалы (агломераты, окатыши) начинают восстанавливаться после нагрева до 250–400 °С. Восстановление Fe_2O_3 и Fe_3O_4 до металлического железа происходит последовательно, через все промежуточные оксиды.

Не все железо в доменной печи восстанавливается из свободных оксидов. Некоторая часть связана в химические соединения с другими оксидами, например, ферросилит (FeSiO_3). Однако в результате превращений в печи они так или иначе переходят в оксиды, из которых и происходит восстановление.

Основная часть железа восстанавливается из оксидов, находящихся в твердом состоянии. Некоторая часть оксидов, не успевших восстановиться к началу шлакообразования и плавления шлака, переходит в жидкий шлак, откуда восстановить железо труднее, чем из свободных оксидов.

В области температур до 900 °С восстановление оксидов железа монооксидом углерода идет по реакциям (2.1)–(2.4). Выделяющийся при восстановлении CO_2 уносится вверх потоком газа через межкусковые каналы.

Процесс восстановления существенно изменяется, когда шихта опускается до горизонтов 900–1000 °С. В этой зоне доменной печи весь образующийся CO_2 начинает взаимодействовать с углеродом кокса.

Реакция взаимодействия диоксида углерода с углеродом кокса — реакция газификации углерода кокса, получившая название реакция Белла — Будуара в честь ее исследователей, описывается уравнением



Реакция обратима. Равновесие данной реакции зависит от температуры и давления. Кривая равновесных составов газовой фазы, представленная на диаграмме (рис. 2.7), разделяет поле диаграммы на 2 области. В левой области реакция идет в сторону образования CO_2 и сажистого С, в правой — в сторону образования CO .

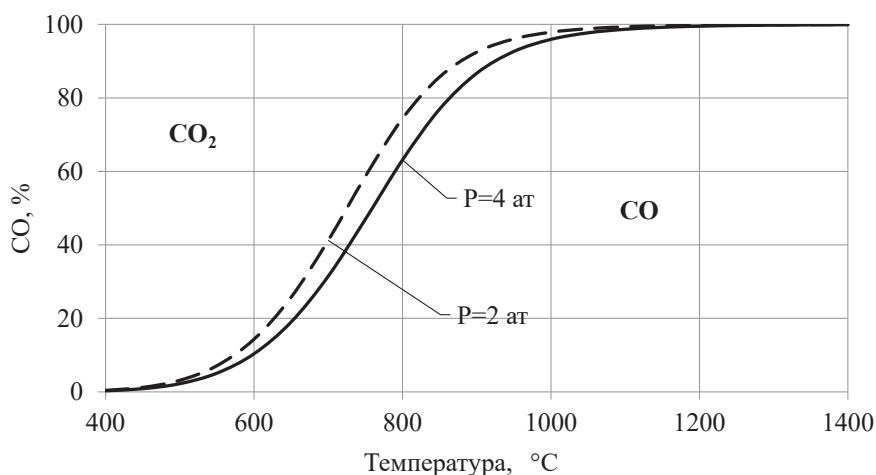


Рис. 2.7. Равновесный состав газовой фазы с углеродом (диаграмма С — CO — CO_2)

Реакция протекает с изменением объема газовой фазы, поэтому с повышением давления равновесие реакции сдвигается в сторону увеличения содержания в газе углекислоты. Кривая смещается вправо и вниз.

Скорость обратной реакции — реакции распада монооксида углерода — незначительна, поэтому для достижения равновесия необходимо длительное время. Реакция практически не оказывает влияния на состав газовой фазы и восстановительные процессы, протекающие в области низких температур.

Прямая реакция — реакция газификации углерода протекает при высоких температурах, отличается высокой скоростью и быстрым до-

стижением равновесия. С ростом температур скорость данной реакции возрастает. Интенсивное развитие реакция получает при температурах выше 1000–1100 °С. Реакция оказывает значительное влияние на состав газовой фазы и восстановительные процессы, протекающие в нижней части шахты печи при высоких температурах.

Совмещение диаграмм, описывающих термодинамические условия равновесия в системах Fe — O — C и C — CO — CO₂ (рис. 2.8), позволяет сделать следующие выводы:

- состав газа левой области препятствует течению восстановительного процесса, состав газа правой области — способствует;
- из-за низких скоростей протекания реакции в левой области диаграммы она не оказывает значительного влияния на восстановительный процесс. Все количество диоксида углерода, которое образуется в результате рассмотренных реакций, при умеренных температурах (до 700–900 °С) ни с чем не взаимодействует и уносится газами из печи;
- реакция оказывает существенное влияние на восстановительный процесс в правой области диаграммы. При температурах 900–1200 °С весь образующийся в результате восстановления оксидов железа углекислый газ полностью расходуется по этой реакции.

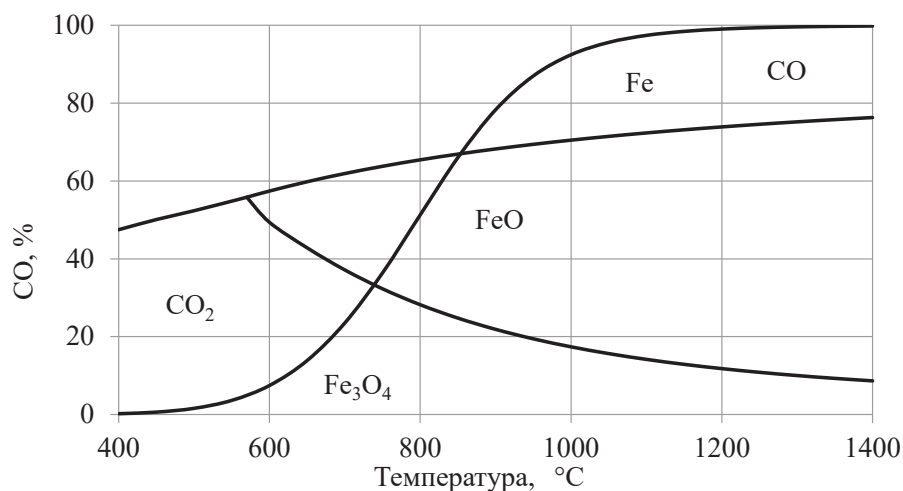
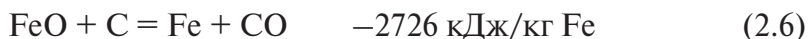


Рис. 2.8. Термодинамические условия равновесия в системах Fe — O — C и C — CO — CO₂

Учитывая, что в высокотемпературной зоне нормально работающей печи частично не восстановленным остается только FeO, на основании вышесказанного можно просуммировать реакции (2.4) и (2.5), протекающие в области высоких температур:



Результирующая реакция имеет вид



В зависимости от вида восстановителя — CO или C — принято различать косвенное (непрямое) и прямое восстановление. Уравнение (2.6) соответствует реакции прямого восстановления, уравнения (2.1)–(2.4) — реакции косвенного восстановления.

Прямое восстановление нельзя рассматривать как непосредственное взаимодействие оксидов железа с углеродом кокса. Из-за малой поверхности контакта этих твердых фаз непосредственное их взаимодействие не может получить заметного развития.

Поверхность контакта несколько увеличивается с переходом оксидов в жидкое состояние, однако она и в этом случае будет значительно меньше, чем при взаимодействии твердых оксидов с газообразным восстановителем. Фактически прямое восстановление оксида железа углеродом идет в две стадии: восстановление оксида железа с образованием углекислоты и разложение углекислоты углеродом.

Оксид углерода, образующийся при горении кокса, поднимаясь вверх, омывает куски руды (рис. 2.9), при этом взаимодействует с оксидом железа с образованием углекислого газа. Углекислый газ, в свою очередь, омывая вышележащие куски кокса, взаимодействует с углеродом кокса и вновь превращается в CO. Это происходит до тех пор, пока газ не достигнет температур, при которых скорость реакции прямого восстановления будет низка и CO₂ будет проходить с газом через верхнюю часть печи. Начиная с этих горизонтов, в газе CO₂ будет накапливаться.

Таким образом, процессы косвенного восстановления постепенно примерно при 900 °C переходят в процессы прямого восстановления. В соответствии с этим доменную печь можно разделить на две зоны: верхнюю (низкотемпературную), где протекают процессы косвенно-

го восстановления, и нижнюю (высокотемпературную), где протекают процессы прямого восстановления (рис. 2.10).

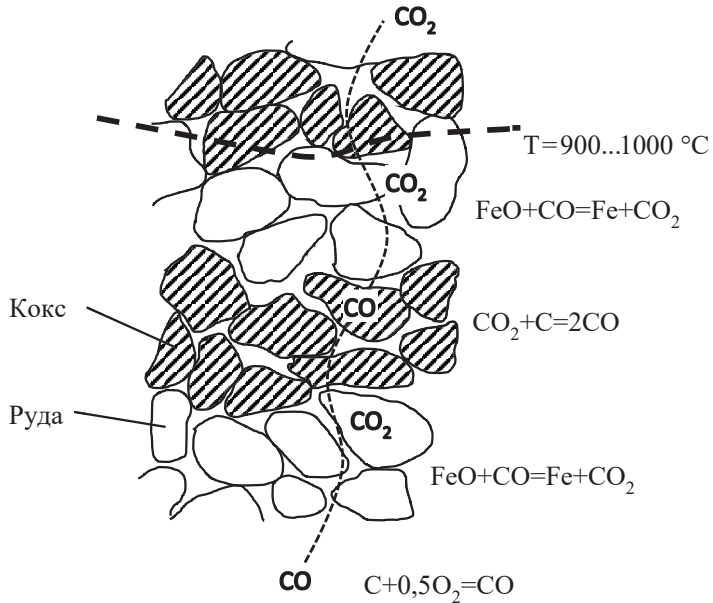


Рис. 2.9. Схема механизма прямого восстановления железорудных материалов

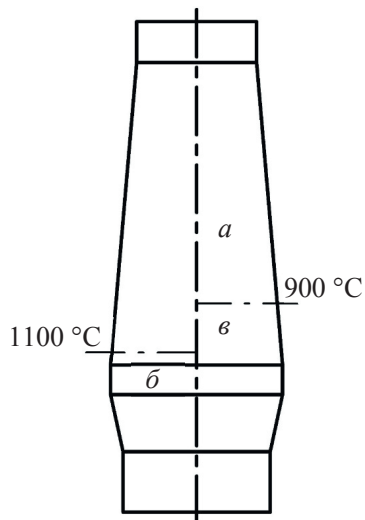


Рис. 2.10. Области косвенного a и прямого b восстановления, область перехода косвенного восстановления в прямое $в$

В интервале температур 900—1100 °С находится область перехода косвенного восстановления в прямое.

В процессе прямого и косвенного восстановления железо в доменных печах почти полностью восстанавливается (99,5—99,8 %) и только малая часть невосстановленного оксида 2-валентного железа переходит в доменный шлак. Содержание FeO в шлаке не превышает 0,3—0,8 %.

Сравнивая процессы прямого и косвенного восстановления, следует обратить внимание на следующее:

- реакции косвенного восстановления идут с выделением тепла, но требуют избыточного количества восстановителя, а тепло, выделившееся при сжигании требуемого количества углерода, не может быть полностью использовано в печи и приводит к созданию области высоких температур в нижней зоне печи;
- реакция прямого восстановления идет с существенными затратами тепла. Кроме того, в процессе прямого восстановления непосредственно расходуется углерод кокса. При прямом восстановлении образуется CO, который используется в процессе косвенного восстановления.

По указанным причинам выплавка чугуна при большем развитии прямого восстановления сопряжена с большим удельным расходом кокса.

Соотношение между развитием процессов прямого и косвенного восстановления должно быть таким, чтобы выделившегося при сгорании углерода тепла было достаточно, но без избытка, для покрытия всех тепловых потребностей процесса. Образовавшегося при этом монооксида углерода должно быть достаточно для протекания косвенного восстановления. При этом мы будем иметь минимальный расход кокса.

Соотношение степеней развития реакций прямого и косвенного восстановления в доменной печи характеризуется разными показателями. Наиболее распространенными являются степень прямого восстановления r_d — отношение количества железа, восстановленного прямым путем ($\text{Fe}^{\text{пб}}$), ко всему восстановленному железу ($\text{Fe}^{\text{пб}} + \text{Fe}^{\text{кб}}$):

$$r_d = \frac{\text{Fe}^{\text{пб}}}{\text{Fe}^{\text{пб}} + \text{Fe}^{\text{кб}}},$$

и индекс косвенного восстановления R_i — отношение количества кислорода, отнятого от оксидов железа при косвенном восстановлении

(O_2^{KB}), ко всему кислороду ($O_2^{PB} + O_2^{KB}$), связанному в оксидах железа железорудных материалов:

$$R_i = \frac{O_2^{KB}}{O_2^{PB} + O_2^{KB}}.$$

Для конкретного железорудного материала сумма степени прямого восстановления и индекса косвенного восстановления является постоянной величиной, близкой к единице — 1,1...1,15. Таким образом, чем больше индекс косвенного восстановления, тем меньше степень прямого восстановления и тем лучше показатели работы печи.

Степень прямого восстановления в современных доменных печах составляет от 0,25—0,40 долей единиц.

Степень развития предпочтительной реакции — реакции косвенного восстановления — определяется двумя группами факторов:

- *реакционной способностью кокса* — способностью углерода кокса взаимодействовать с углекислым газом;
- *восстановимостью железорудных материалов* — способностью оксидов железа отдавать кислород восстановителю.

Реакционная способность зависит от химического состава кокса. Чем больше содержание щелочных примесей, тем выше реакционная способность. Влияние реакционной способности кокса на развитие реакций прямого восстановления проявляется в следующем: чем меньше реакционная способность кокса, тем при более высоких температурах начинается реакция прямого восстановления, что приводит к увеличению области косвенного восстановления железа. Чем выше восстановимость рудных материалов, тем быстрее и, следовательно, полнее протекают процессы косвенного восстановления. Рудные материалы в процессе опускания проходят сначала зону косвенного восстановления, а затем прямого. Поэтому чем выше восстановимость руд, тем большая часть кислорода будет отнята от оксидов железа в зоне косвенного восстановления и меньшая — в зоне прямого. Восстановимость ЖРМ определяется качеством железорудных материалов и условиями восстановления.

Качество железорудных материалов характеризуется типом руды, размером кусков, их пористостью, количеством и составом пустой породы.

Тип руды определяется ее минералогическим составом (см. таблицу).

Минералогический состав руды

Тип руды	Минерал	Химическая формула	Температура начала восстановления, °С
Красный железняк	Гематит	Fe_2O_3	340–350
Бурый железняк	Гетит	$\text{FeO}(\text{OH})$	220–230
Магнитный железняк	Магнетит	Fe_3O_4	450
Сидерит	Сидерит	FeCO_3	400

Тип руды определяет температуру начала восстановления, поэтому при прохождении через зону косвенного восстановления бурые железняки успевают восстановиться в большей степени, чем красные и магнитные. Индекс косвенного восстановления таких руд будет выше.

Большое влияние на восстановимость руд оказывает *размер кусков руды*. Восстановление оксидов железа является гетерогенной реакцией, происходит на поверхности раздела фаз (восстанавливаемый оксид — газ). Мелкие куски имеют более развитую поверхность, поэтому их восстановимость выше.

Куски руды проходят зону косвенного восстановления в течение определенного времени. Зависимость степени восстановления кусков руды разного диаметра от времени при постоянной температуре представлена на рис. 2.11.

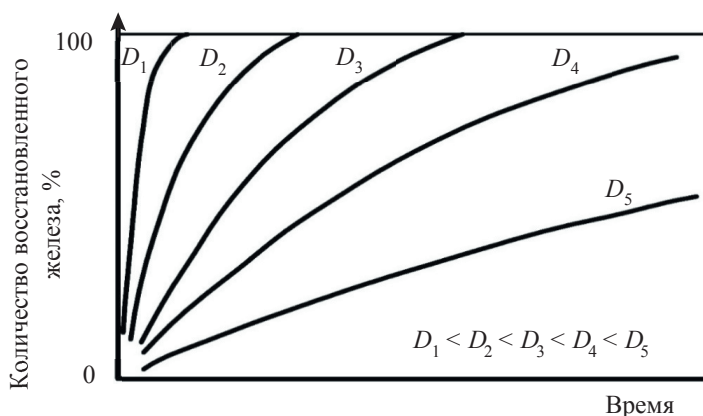


Рис. 2.11. Зависимость степени восстановления кусков руды разного диаметра от времени при постоянной температуре

Одним из мероприятий, направленных на повышение восстановимости железных руд, является дробление рудных материалов перед их

загрузкой в печь. Зависимости степени восстановления кусков руды от диаметра для момента времени, соответствующего началу развития реакции прямого восстановления, приведены на рис. 2.12.

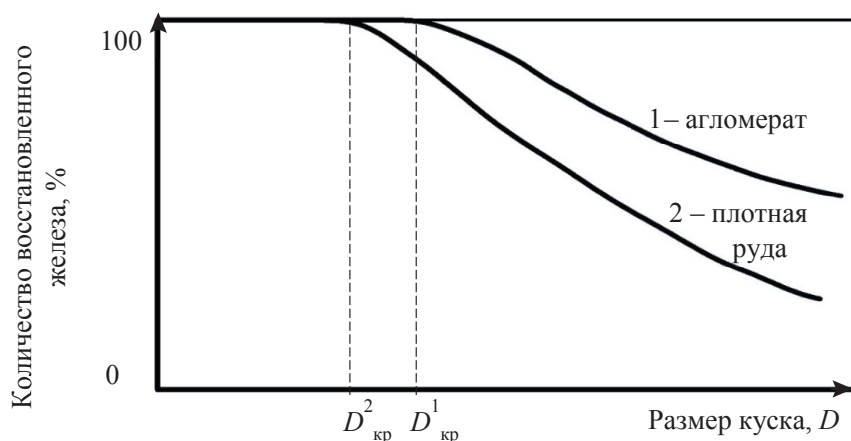


Рис. 2.12. Зависимость степени восстановления кусков руды в области косвенного восстановления от диаметра кусков

До определенного размера куски успевают восстановиться полностью и косвенным путем. Для кусочков с диаметром менее критического их размер не влияет на степень восстановления. Куски большего диаметра частично восстанавливаются прямым путем. Критический диаметр для руд составляет 30–60 мм и зависит от качества руд.

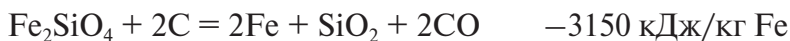
В реальных условиях доменной печи до температур 900–1000 °С процесс лимитируется кинетическим звеном. Выше указанных температур лимитирующим звеном становится диффузия ионов в кристаллической решетке, затрудняемая непрерывно утолщающимся слоем восстановленного железа и начинающимся спеканием, которое снижает пористость рудного материала. При этом чем больше диаметр восстанавливаемого куска, тем в большей степени процессы внутренней диффузии лимитируют скорость восстановления. Следовательно, размеры кусков рудного материала и его восстановимость должны быть оптимальными.

Существенное значение имеет *пористость руды*. Наличие открытых, тем более сквозных пор увеличивает удельную поверхность кусков и облегчает проникновение газа-восстановителя во внутрь куска, что способствует существенному повышению восстановимости руд. Для

таких рудных материалов кривая, описывающая зависимость восстановимости от размера куска, пройдет выше (см. рис. 2.12). Критический диаметр увеличивается до 70 мм.

Значительно увеличивают пористость рудных материалов процессы окускования, агломерат: окатыши имеют пористость в 6–8 раз больше, чем природные руды.

На восстановимость руд оказывает влияние *состав пустой породы*. Диоксид кремния, содержащийся в пустой породе железорудных материалов, при высоких температурах взаимодействует с оксидом железа, образуя фаялит Fe_2SiO_4 . Это очень прочное химическое соединение, из которого железо восстанавливается с большими затратами тепла при высоких температурах путем прямого восстановления:



Таким образом, большое количество оксида кремния ухудшает восстановимость руд. Повысить восстановимость руды можно:

- посредством удаления пустой породы в процессе обогащения;
- посредством флюсования пустой породы, то есть добавлением флюсов.

Существенно восстановимость руд увеличивается при их агломерации с добавлением мелкодробленого известняка. В этом случае в процессе агломерации вместо фаялита образуются железокальцевые оливины $\text{CaO}_m\text{Fe}_{2-m}\text{SiO}_4$, в которых оксид кальция вытесняет оксид железа. Кроме того, в оливине железо связано менее прочно, чем в фаялите, и поэтому офлюсованный агломерат имеет большую восстановимость, чем неофлюсованный.

Условия восстановления. Помимо свойств железорудных материалов, на их восстановимость большое влияние оказывают условия восстановления: температура, давление, состав газовой фазы:

1. Влияние температуры.

Протекание реакций определяется термодинамическими закономерностями и кинетикой процессов. Если первое определяет возможность протекания тех или иных процессов, то второе определяет скорость, а следовательно, полноту протекания реакций.

В соответствии с общепринятой адсорбционно-автокаталитической теорией восстановления длительность протекания процесса определяется протеканием самого медленного звена, которым обычно является стадия, связанная с изменением кристаллической решетки.

С повышением температуры константа скорости реакции и коэффициент диффузии увеличиваются, следовательно, скорость восстановительных процессов возрастает и в зоне косвенного восстановления успевает восстановиться большее количество железа.

При этом необходимо иметь в виду, что температура не должна превышать температуру, при которой происходит переход от реакций косвенного восстановления к реакции прямого восстановления, так как при этом уменьшится протяженность зоны косвенного восстановления, что приведет к увеличению степени прямого восстановления.

2. Влияние давления.

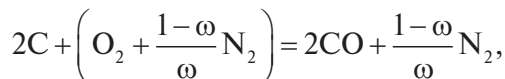
Повышение давления оказывает влияние на равновесие тех реакций, которые идут с изменением объема газовой фазы.

При протекании реакций косвенного восстановления объем газовой фазы остается постоянным. Следовательно, неизменными остаются при изменении давления и условия равновесия. Реакция прямого восстановления протекает с увеличением объема газовой фазы, поэтому увеличение давления сдвигает условия равновесия реакции в сторону более высоких концентраций диоксида углерода. Это приводит к тому, что переход реакций косвенного восстановления в реакции прямого восстановления происходит при более высоких температурах. Зона косвенного восстановления в печи увеличивается за счет зоны прямого восстановления, и в ней успевает восстановиться большее количество железа.

3. Влияние состава газовой фазы.

Основными компонентами доменного газа являются азот и монооксид углерода. Чем выше концентрация монооксида углерода и ниже концентрация азота, тем выше индекс косвенного восстановления.

Увеличить концентрацию монооксида углерода можно путем обогащения дутья кислородом. Реакция горения углерода описывается уравнением



где ω — содержание кислорода в дутье, m^3/m^3 .

При содержании кислорода в дутье 21 % (атмосферный воздух) и 25 % (обогащенное кислородом дутье) количество монооксида углерода в восстановительном газе составит:

- при 21 % O_2 $2C + (O_2 + 3,76N_2) = 2CO + 3,76N_2$,
 $CO = 2/(2 + 3,76) \cdot 100 = 34,7 \%$;

- при 25 % O_2 $2C + (O_2 + 3N_2) = 2CO + 3N_2$,
 $CO = 2/(2 + 3) \cdot 100 = 40 \%$.

При увеличении содержания кислорода в дутье индекс косвенного восстановления возрастает и удельный расход кокса снижается.

При этом необходимо отметить, что от содержания кислорода в дутье зависит количество дутья, необходимого для сжигания 1 кг углерода кокса. При обогащении дутья кислородом расход дутья снижается, следовательно, и уменьшается выход газа. Уменьшение выхода газа (газ является теплоносителем в печи) приводит к снижению температуры в шахте печи, то есть в зоне косвенного восстановления. При больших концентрациях кислорода в дутье (выше 30 %) температура в шахте, а следовательно, и скорость косвенного восстановления настолько снижаются, что большая часть железа поступает в область прямого восстановления невосстановленной. Степень прямого восстановления возрастает, что ведет к увеличению удельного расхода кокса.

Влияние обогащения дутья на восстановимость железорудных материалов имеет сложный, неоднозначный характер, зависящий от местного протекания процессов восстановления и теплообмена.

Водород восстанавливает оксиды железа быстрее, чем монооксид углерода и существенно ускоряет процесс косвенного восстановления. Средствами введения водорода в доменный газ являются вдувание с дутьем в печь паров воды и природного газа или мазута. При вдувании паров воды водород образуется при их разложении в горне:



Из-за больших затрат тепла и расхода углерода на разложение паров воды температура в горне печи понижается, что приводит к ограничению вдувания паров воды в печь до 20 г/м³.

При вдувании природного газа водород образуется в результате конверсии метана, являющегося основным компонентом газа:



Объем газов в результате конверсии метана увеличивается в два раза. Часть выделившегося тепла расходуется на нагрев продуктов конверсии. Тепла, выделяющегося при конверсии природного газа, недостаточно для того, чтобы обеспечить необходимые для ее протекания температуры. В результате горн охлаждается. Этим ограничивается вдувание природного газа до 120 м³/т. Но даже такое количество по-

звolyет сократить степень прямого восстановления железа с 50–55 % до 35–40 % и понизить удельный расход кокса на 12–15 %.

Очень сильное тормозящее действие на процесс косвенного восстановления оказывает содержание в газовой фазе *углекислого газа*.

Диоксид углерода лучше, чем монооксид углерода, адсорбирует на поверхности восстанавливаемого оксида. Даже при небольшом его содержании в газовой фазе соотношение CO_2/CO в адсорбируемом слое оказывается близким к равновесному. Поэтому даже самые малые количества CO_2 в газовой фазе сильно замедляют восстановление.

Диоксид углерода образуется в доменной печи в результате косвенного восстановления и при разложении известняка ($\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$).

Высокое содержание CO_2 в колошниковом газе при незначительном расходе известняка свидетельствует о большом развитии процессов косвенного восстановления. Большое количество CO_2 , выделившееся при разложении известняка, затормаживает процесс косвенного восстановления. В данном случае часть железа, не восстановившегося в зоне косвенного восстановления и восстановившегося в зоне прямого восстановления, возрастает. Это в свою очередь вызывает повышенный удельный расход кокса.

Использование офлюсованного агломерата или окатышей, позволяющее исключить из доменной шихты сырой известняк, приводит к существенному повышению индекса косвенного восстановления в печи и снижению удельного расхода кокса.

2.3. Восстановление примесных элементов

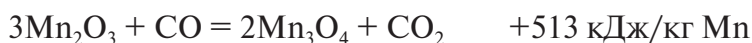
Основным источником примесей в чугуне являются железные руды. Во всех железных рудных материалах содержатся в большем или меньшем количестве кремний, марганец, сера, фосфор. В зависимости от месторождения руды могут содержать также титан, ванадий (титаномагнетитовые руды), хром, никель (хромоникелевые руды), медь, кобальт, свинец. Все металлы в рудах содержатся, как правило, в виде оксидов. В ходе доменного процесса оксиды в большей или меньшей степени восстанавливаются и распределяются между продуктами плавки: чугуном и шлаком.

Содержание примесей в чугуна определяется их количеством, вносимым шихтовыми материалами, а также температурным и шлаковым режимом плавки. Рассмотрим условия восстановления в доменной печи примесей, постоянно присутствующих в железных рудах и имеющих значение с точки зрения качества чугуна.

Восстановление оксидов марганца. Основная часть марганца поступает в доменную печь с рудными материалами в виде оксидов MnO_2 , Mn_2O_3 , Mn_3O_4 . Оксиды марганца восстанавливаются в соответствии с принципом последовательности превращений А. А. Байкова от высшего оксида к низшему:



Высшие оксиды (MnO_2 , Mn_2O_3 , Mn_3O_4) непрочны и восстанавливаются при невысоких температурах в верхней части печи монооксидом углерода:



Восстановление высших оксидов марганца начинается при температурах 190–200 °С и сопровождается значительным выделением тепла.

В отличие от высших оксидов марганца монооксид марганца (MnO) является очень прочным оксидом и может восстанавливаться только при высоких температурах (1000–1100 °С) в нижней части печи по реакции прямого восстановления:



Реакция восстановления эндотермическая, восстановлению марганца способствуют более высокие температуры, то есть повышенный расход топлива.

Поскольку восстановление элементов в нижней зоне печи осуществляется из расплава (шлака), помимо температурного режима доменной плавки, на степень восстановления оказывает влияние шлаковый режим плавки, то есть количество и состав доменного шлака. Важной характеристикой состава доменного шлака является его основность.

Основность доменного шлака B определяется как отношение содержания оксидов, проявляющих основные свойства, к оксидам, проявляющим кислотные свойства:

$$B = \frac{(\text{CaO})}{(\text{SiO}_2)}.$$

Основность доменного шлака изменяется в узких пределах 0,9–1,3. Шлаки основностью менее 1 принято называть кислыми, в отличие от основных шлаков с основностью более 1.

Рассмотрим влияние основности и выхода шлака на степень восстановления марганца.

Оксид марганца обладает основными свойствами. Если шлак при выплавке чугуна кислый, то есть содержит большое количество SiO_2 , то MnO будет взаимодействовать с оксидом кремния по реакции



Восстановление марганца из получающегося при этом силиката марганца сопровождается еще большими затратами тепла, требует более высоких температур, чем при восстановлении из MnO :



При основных шлаках (шлаках с высоким содержанием CaO) SiO_2 взаимодействует с оксидом кальция, который является более сильным основанием, чем MnO , и не препятствует восстановлению марганца.

Таким образом, вторым условием получения марганцовистых чугунов является повышение основности шлака.

На степень восстановления марганца большое влияние оказывает количество шлака, что отражено в формуле баланса марганца, записанного в расчете на 1 т чугуна:

$$\sum \text{Mn}_i R_i = 1[\text{Mn}] + \text{Ш}(\text{Mn}), \quad (2.7)$$

где Mn_i — содержание Mn в i -м компоненте доменной шихты, доли ед.; R_i — расход i -го материала, т/т чугуна; $[\text{Mn}]$ — содержание марганца в чугуне, доли ед.; Ш — выход шлака, т/т чугуна; (Mn) — содержание марганца в шлаке, доли ед.

Выход шлака — отношение массы шлака к массе чугуна:

$$\Pi = \frac{M_{\text{шл}}}{M_{\text{чуг}}}.$$

При определенном нагреве печи и основности шлака между концентрациями марганца в шлаке и чугуне устанавливается постоянное соотношение, которое в общем случае является функцией температуры в печи и основности шлака:

$$\frac{(\text{Mn})}{[\text{Mn}]} = L_{\text{Mn}} = f \left[t, \frac{(\text{CaO})}{(\text{SiO}_2)} \right], \quad (2.8)$$

где L_{Mn} — коэффициент распределения марганца (уменьшается с ростом температуры и основности шлака); t — температура шлака.

С учетом соотношения (2.8) балансовое уравнение (2.7) можно представить в следующем виде:

$$[\text{Mn}] = \frac{\sum \text{Mn}_i R_i}{1 + L_{\text{Mn}} \Pi}. \quad (2.9)$$

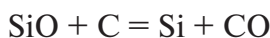
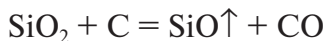
Как видно из уравнения (2.9), чем меньше выход шлака, тем больше концентрация марганца в чугуне, то есть тем выше степень восстановления марганца.

Таким образом, третье условие увеличения степени восстановления марганца — это уменьшение выхода шлака при выплавке чугуна, то есть использование более богатых железом руд.

Степень восстановления марганца (или иначе — переход его в чугун) при выплавке передельных чугунов составляет 40–60 %. При выплавке литейных чугунов, когда температура в печи выше, эта величина поднимается до 70 %. При выплавке ферромарганца, когда создаются наиболее благоприятные условия для восстановления марганца, она достигает 80 %. Остальная часть марганца в виде его закиси (MnO) остается в шлаке. Выплавка чугунов с высоким содержанием Mn сопровождается повышением удельного расхода кокса.

Восстановление оксида кремния. Кремний поступает в доменную печь в виде диоксида кремния (SiO_2) — одного из основных компонентов пустой породы рудных материалов и золы кокса. Диоксид кремния может восстанавливаться только при высоких температурах (выше 1350 °C) в нижней части печи.

В доменной печи SiO_2 восстанавливается из золы кокса. Реакция протекает через промежуточный оксид SiO , который легко испаряется и в условиях доменной плавки и находится в газообразном состоянии:



Суммарная реакция имеет следующий вид:

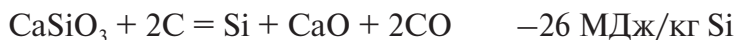


Реакция восстановления кремния эндотермическая, поэтому чем выше температура, тем выше скорость реакции, то есть количество восстановленного кремния в единицу времени. Следовательно, при высоких температурах в печи содержание кремния в чугуне будет выше.

Влияние температуры на степень восстановления кремния столь велико, что содержание кремния в чугуне используется доменщиками как важнейший показатель нагрева печи. Поэтому доменщики внимательно следят за изменением содержания кремния в выпускаемом чугуне, определяя его не только путем химического анализа, но и по виду излома пробы и виду текущего по желобу чугуна. Нагрев печи можно изменить, изменив приход тепла в печь. Основным средством для этого является изменение удельного расхода топлива.

Поскольку процесс восстановления кремния идет с увеличением объема газовой фазы, увеличение давления в доменной печи будет затруднять восстановление кремния. Опыт работы современных доменных печей на повышенном давлении подтверждает данный факт. Содержание кремния в передельном чугуне при нормальном температурном режиме может составлять до 0,1 %.

SiO_2 — кислотный оксид, и в основных шлаках он связывается оксидом кальция в силикаты кальция (CaSiO_3). Восстановление кремния из CaSiO_3 требует еще больших затрат тепла и, следовательно, еще более высоких температур:



Поэтому чем ниже основность шлаков, тем лучше условия восстановления кремния.

Количество шлака также оказывает влияние на степень восстановления кремния. Чем меньше шлака, тем ниже затраты тепла на про-

изводство чугуна и тем легче повысить температуру в печи. Поэтому условием увеличения степени восстановления кремния является работа с меньшим выходом шлака (использование богатых железорудных материалов). Таким образом, для повышения степени восстановления кремния необходимы высокие температуры и низкий выход кислого шлака.

Фактическое содержание кремния в чугуне далеко от равновесного. Поэтому можно считать, что содержание кремния в чугуне зависит от кинетики процесса, то есть от времени пребывания расплава на коксовой насадке.

Степень восстановления кремния в доменных печах при выплавке передельных чугунов составляет всего 3–8 %. При выплавке литейных чугунов за счет увеличения температуры в печи степень восстановления кремния поднимается до 15–25 %. И только при выплавке ферросилиция, когда создаются наиболее благоприятные условия для восстановления кремния, она достигает 35–50 %.

Выплавка чугунов с высоким содержанием кремния сопровождается существенным повышением удельного расхода кокса.

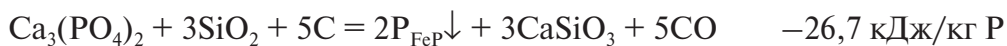
Восстановление фосфора. Фосфор в доменные печи попадает главным образом с рудными материалами в виде ортофосфата кальция $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ и подобных ему соединений. Несмотря на то что оксид фосфора очень прочное соединение (восстановление его возможно только при высоких температурах в области прямого восстановления), в доменной печи фосфор полностью восстанавливается и переходит в чугун.

Полному восстановлению фосфора способствует ряд обстоятельств.

Фосфора в доменные печи попадает сравнительно мало (но не с точки зрения получения качественного чугуна, а с точки зрения его относительного количества).

В пустой породе рудных материалов и золе кокса имеется достаточно двуокиси кремния, которая вытесняет оксид фосфора (P_2O_5 — кислотный оксид) из ее соединений с основными оксидами. Восстановленный фосфор образует фосфиды железа (FeP), которые растворяются в чугуне, и таким образом удаляется из системы реагирующих компонентов. Растворение фосфора в железе сдвигает равновесие в сторону образования фосфора.

Вследствие указанных причин процесс восстановления фосфора идет практически необратимо:



Таким образом, учитывая, что фосфор полностью переходит в чугун, единственным средством борьбы с ним при производстве чугуна является использование чистых по фосфору шихтовых материалов.

Восстановление прочих оксидов. Помимо рассмотренных выше компонентов, в шихтовых материалах могут присутствовать оксиды цветных и щелочных металлов: кальция, алюминия, магния, никеля, кобальта, меди, свинца, цинка, хрома, титана, ванадия, калия, натрия.

CaO , MgO , A_2O_3 в доменной печи не восстанавливаются и полностью переходят в шлак.

Оксиды никеля, меди, кобальта полностью восстанавливаются и переходят в чугун, и их содержание в чугуне зависит от количества этих металлов в шихте.

Хром, ванадий и титан в доменных печах восстанавливаются из оксидов и переходят в чугун частично (80–90 % Cr, 70–90 % V, 3–5 % Ti), а не восстановленная часть их оксидов переходит в шлак.

Цинк полностью восстанавливается из оксидов, испаряется и, попадая с газами в верхнюю часть печи и в газоотводы, конденсируется на восстановленном железе. Данное явление затрудняет косвенное восстановление оксидов железа, что ведет к перерасходу кокса. Опускаясь вместе с рудными материалами, цинк снова испаряется. В доменной печи цинк накапливается и образует зону циркуляции. Часть цинка в виде мелких частиц цинкита с газами проникает в поры и трещины огнеупорной кладки и там конденсируется, а также уносится из печи газами и осаждается в системе газоочистки. Накопившиеся в порах, швах и трещинах кладки печи цинк и цинкит могут вызвать в ней напряжения. Кроме того, на стенках печи могут образовываться так называемые настывы. На качество чугуна цинк никакого влияния не оказывает.

Восстановленный свинец быстро стекает в горн. Поскольку он более плотный и не растворяется в чугуне, то скапливается на лещади печи самостоятельным слоем. Будучи сильно перегретым и имея малую вязкость и высокую плотность, он легко проникает в поры и швы огнеупорной кладки и разрушает ее.

Калий и натрий в доменных печах не восстанавливаются, а частично испаряясь (на 30–40 %), переходят в шлак.

2.4. Десульфурация чугуна в доменной печи

Сера в доменную печь вносится железорудными материалами, коксом и топливом, вдуваемым через воздушные фурмы. Наибольшее количество серы вносит кокс. Как правило, такая доля достигает 65 % и более, а в ряде случаев — 90 %.

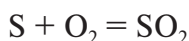
В коксе сера в основном (на 80 %) является органической, то есть находится в виде органических соединений, входящих в состав горючей массы кокса. Остальная сера — это сера, входящая в состав золы кокса, которая является сульфидной серой, связанной с железом в FeS.

В железорудных материалах сера находится в виде:

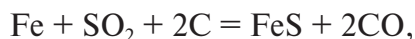
- сульфидов: пирита (FeS_2), пирротина (FeS) — в магнитных железняках;
- сульфатов: CaSO_4 , BaSO_4 — в окисленных рудах, агломератах и окатышах.

Вдуваемое топливо (угольная пыль и мазут) также может содержать серу. Сера в них содержится в виде органических соединений.

Органическая сера кокса в основной своей массе доходит до фурм и вместе с углеродом сгорает по реакции



Поднимаясь с газами через слой раскаленных материалов, в заплечиках и распаре печи сернистый газ взаимодействует с Fe, FeO и углеродом с образованием сульфидов железа (FeS) по реакциям

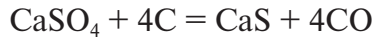


При взаимодействии сернистого газа с оксидами кальция образуется CaS:



В этих процессах сера восстанавливается из SO_2 до элементной серы и взаимодействует с Fe, Ca, образуя соответствующие сульфиды.

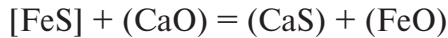
Попавшие в доменную печь сульфаты при высоких температурах будут восстанавливаться углеродом по реакции



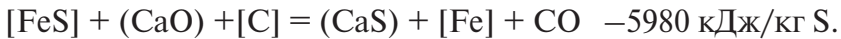
Входящий в состав железорудных материалов пирит (FeS_2) диссоциирует с образованием FeS и S , которая увлекается газами и, проходя через слой материалов, может взаимодействовать с FeO с образованием FeS .

Таким образом, в результате описанных процессов сера будет находиться либо в виде FeS , хорошо растворимого в чугуне, либо в виде CaS , растворимого в шлаке и нерастворимого в чугуне.

Для того чтобы получить чистый по сере металл, необходимо как можно больше серы перевести в CaS , то есть в шлак. В условиях доменной плавки это возможно в результате реакции обмена:



Поскольку атмосфера в доменной печи восстановительная, то FeO восстанавливается углеродом. Данное обстоятельство является характерной особенностью десульфурации в доменных печах, обеспечивающей необратимость суммарной реакции:



Вещества, участвующие в процессе десульфурации, находятся либо в чугуне (FeS , Fe , C), либо в шлаке (CaO , CaS), поэтому процесс десульфурации может протекать на границе их раздела. Наиболее благоприятные условия для его развития создаются в горне печи, когда капли чугуна проходят через слой шлака.

Условия равновесия рассматриваемого процесса выражаются константой равновесия

$$K_p = \frac{a_{\text{CaS}}}{a_{\text{CaO}} a_{\text{FeS}}} = f(t),$$

где a — активности соответствующих компонентов.

Без большой погрешности можно принять допущение о пропорциональности активности веществ их концентрации и, учитывая, что содержание серы в шлаке пропорционально содержанию в (CaS) , а содержание серы в чугуне пропорционально содержанию $[\text{FeS}]$, можно записать

$$[\text{S}] = \frac{(\text{S})}{K_p (\text{CaO})}. \quad (2.10)$$

Из уравнения (2.10) следует, что для снижения содержания серы в чугуне надо увеличивать концентрацию (CaO).

Известно, что константа равновесия реакции десульфурации является функцией только температуры. Поскольку реакция идет с поглощением тепла, то с повышением температуры, согласно принципу Ле-Шателье, ее равновесие сдвигается вправо, то есть в сторону увеличения концентрации (CaS). Поэтому чем выше температура, тем выше значение K_p и, следовательно, содержание серы в металле.

Уравнение, связывающее содержание серы в чугуне с параметрами шихты, шлака и константой равновесия, можно получить на основе баланса серы, который записывается следующим образом:

$$\sum (S_i R_i) = [S] + (S)Ш + \{S\}V_{\Gamma}, \quad (2.11)$$

где S_i , $[S]$, (S) , $\{S\}$ — соответственно содержание серы в i -м материале, в чугуне, шлаке и газе; R_i — удельный расход i -го материала; Ш — удельный выход шлака; V_{Γ} — удельный выход газа.

Основная часть серы распределяется между чугуном и шлаком. Отношение концентраций серы в шлаке (S) и чугуне $[S]$ называется коэффициентом распределения серы между шлаком и чугуном

$$L_s = \frac{(S)}{[S]}.$$

Коэффициент распределения серы может быть выражен следующим образом:

$$L_s = \frac{(S)}{[S]} = K_p (\text{CaO}). \quad (2.12)$$

Из уравнения (2.12) следует, что L_s является функцией температуры и зависит от основности шлака. Выразив содержание серы в шлаке через $[S]$ и L_s , получим

$$(S) = [S] L_s. \quad (2.13)$$

Подставив выражение (2.13) в правую часть балансового уравнения (2.11) вместо (S) , получим

$$[S] = \frac{\sum(S_i R_i) - \{S\} V_r}{1 + \Pi L_s}. \quad (2.14)$$

Поскольку значение L_s с ростом температуры и основности шлака возрастает, то из уравнения (2.14) вытекает, что для удаления серы из металла необходимы высокие температуры в печи, повышенная основность шлака и увеличение его количества. При создании необходимых условий степень удаления серы может составлять 90–95%, однако это требует увеличения удельного расхода топлива и сопровождается снижением производительности печи. В связи с этим представляет интерес внедоменная десульфурация чугуна.

Внедоменная десульфурация чугуна позволяет вывести данный процесс из доменной печи, работать при малых выходах кислого шлака и нормальных температурах в печи и, следовательно, иметь низкий удельный расход кокса и высокую производительность печи.

Существует несколько способов внедоменной десульфурации чугуна, которые отличаются реагентами, используемыми для этой цели, способом их присадки в чугун, конструкцией устройств для ввода присадок и т. д. Основной технологией десульфурации чугуна является вдувание реагентов (известь, карбид кальция, металлический магний) в чугуновозный ковш азотом.

2.5. Испарение влаги, разложение гидратов и карбонатов

Испарение гигроскопической влаги. Все шихтовые материалы обладают большей или меньшей гигроскопичностью. При хранении на складах они поглощают влагу из атмосферы или увлажняются осадками. Количество гигроскопичной влаги в материалах обычно невелико (3–4%) и только в отдельных рудах (бурых железняках) содержание ее доходит до 20%.

Гигроскопичная влага испаряется при нагреве материалов в печи. При небольшом содержании влаги в материалах испарение не оказывает никакого влияния на доменный процесс в целом. При высоком содержании влаги в шихте процесс испарения сопровождается заметным снижением температуры в верхней части печи и замедлением прогрева кусков руды. Выходящие из внутренних частей кусков пары воды

затрудняют проникновение в куски газа-восстановителя. Все это приводит к задержке начала восстановления оксидов железа, к сокращению размеров зоны косвенного восстановления и, в конечном итоге, к уменьшению степени косвенного восстановления. Ускорить испарение влаги можно, уменьшая размер кусков руды, загружаемой в печь.

Работа современных доменных печей характеризуется низкими температурами на колошнике. При температуре газа менее 140 °С водяные пары будут оседать на шихтовых материалах и при движении шихты в зону более высоких температур испаряться, то есть в печи влага будет циркулировать.

Разложение гидратов. В некоторых рудах (в бурых железняках) железо находится в виде гидроксидов железа, например в виде гётита (FeOOH или $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Количество химически связанной гидратной влаги в такой руде достигает 10–12 %. При нагреве до 150–350 °С гидроксиды железа начинают разлагаться:



Скорость разложения гидратов существенно замедляется с увеличением размера кусков руды. Чем больше размер кусков, тем на более низких горизонтах печи закончится разложение. При этом необходимо иметь в виду, что пока оксид железа не выделится из гидрата, его восстановление не начнется.

Выделяющиеся из куска при разложении гидроокиси пары воды препятствуют проникновению в кусок газа-восстановителя. Таким образом, задержка разложения гидроксида железа приводит к уменьшению индекса косвенного восстановления железа. В случае задержки разложения гидроксидов железа выделяющаяся гидратная влага взаимодействует с CO:



При температурах выше 1000 °С влага начинает активно взаимодействовать с углеродом кокса:



Данный процесс идет с затратами значительных количеств тепла и соответственно углерода (0,67 кг/кг H_2O). Таким образом, при за-

держке процесса разложения гидратов увеличивается удельный расход топлива из-за увеличения затрат тепла и углерода на разложение гидратной влаги и на прямое восстановление железа (в связи с уменьшением индекса косвенного восстановления). При этом чем меньше степень разложения гидратной влаги монооксидом углерода, тем большая часть ее будет разлагаться углеродом кокса.

Современные доменные печи работают практически без использования сырой руды.

Разложение карбонатов. Из карбонатов в доменную печь в наибольшем количестве поступает известняк CaCO_3 , при разложении которого образуется окись кальция, необходимая для получения шлака из пустой породы руд и золы топлива:



Процесс диссоциации начинается при температуре, при которой упругость диссоциации известняка, то есть равновесное давление CO_2 , при котором не происходит ни разложения CaCO_3 , ни образования его в результате взаимодействия CaO и CO_2 , становится больше парциального давления CO_2 в атмосфере печи, то есть при температурах 750–850 °С. Когда упругость диссоциации CaCO_3 превышает общее давление в печи, начинается бурное разложение известняка. В доменной печи оно возможно при температурах выше 900–1000 °С.

Таким образом, разложение известняка начинается в нижней части зоны косвенного восстановления, почти на ее границе с зоной прямого восстановления. Это приводит к тому, что выделяющийся при реакции диссоциации CO_2 поступает в газ в начале его движения через зону косвенного восстановления, что затормаживает процессы косвенного восстановления и индекс косвенного восстановления в печи уменьшается.

При этих температурах CO_2 взаимодействует с углеродом кокса, в результате чего расходуется 0,12 кг углерода кокса на 1 кг CaCO_3 :



Суммарная реакция разложения карбоната кальция имеет следующий вид:



Диссоциация CaCO_3 при высоких температурах сопровождается также почти вдвое большим расходом тепла.

Таким образом, загрузка в доменные печи известняка приводит к увеличению удельного расхода топлива за счет замедления косвенного восстановления, больших затрат тепла на разложение известняка и дополнительного расхода углерода на восстановление выделяющегося при этом диоксида углерода.

Удельный расход кокса можно несколько снизить за счет уменьшения размера кусков известняка, загружаемого в доменную печь. Количество известняка, разлагающегося при температурах ниже 900–1000 °С, при этом будет несколько больше и затраты тепла и углерода на восстановление CO_2 уменьшатся.

В доменных печах обычно используют продукт подготовки руд — офлюсованный агломерат, который получается путем добавки мелкодробленого известняка к мелкой руде или концентрату, подвергаемым агломерации, благодаря чему известняк из доменной шихты полностью или почти полностью исключен. Агломерат не содержит гидратной и, как правило, гигроскопичной влаги. Использование офлюсованного агломерата явилось одной из причин существенного сокращения расхода кокса.

В связи с указанным рассмотренные реакции в доменных печах либо отсутствуют, либо развиты очень слабо и не оказывают влияния на доменный процесс.

2.6. Образование чугуна и шлака

Металлическое железо, являясь продуктом восстановления рудных материалов, появляется в шахте доменной печи при температурах 700–800 °С в твердом состоянии в виде губчатого железа. По мере опускания материалов при температурах около 900–1000 °С происходит интенсивное науглероживание железа.

Наиболее вероятно оно идет по реакции



Необходимо учитывать, что при температурах выше 900–1000 °С образующийся диоксид углерода будет взаимодействовать с углеродом

по реакции $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$. Суммарная реакция процесса науглероживания железа имеет следующий вид:



Таким образом, науглероживание железа в доменных печах так же, как и прямое восстановление оксидов железа, происходит через посредство газовой фазы.

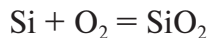
Окончательное содержание углерода в чугуне определяется наличием в последнем примесей Mn, Cr, V, Ti — карбидообразующих элементов. Они связывают в карбиды дополнительное количество углерода и тем самым способствуют увеличению содержания углерода в чугуне.

Как только содержание углерода в железе станет равным 4,3 %, при температуре 1130 °С образуется эвтектика и первые капли жидкого чугуна. Стекая по кускам еще ненауглероженного губчатого железа и кокса, они растворяют и железо, и углерод. Процесс образования чугуна при этом ускоряется.

Размер капель чугуна, стекающего по кускам, определяется его плотностью и поверхностным натяжением на границе раздела чугуна—газ. Чугун является сравнительно подвижной жидкостью, имеющей на выпуске из печи вязкость $(1,5...3,5) \cdot 10^{-3}$ Па·с. Поэтому он, образуя сравнительно небольшие капли, довольно быстро стекает по кускам кокса вниз.

В процессе стекания переходят в чугун восстанавливающиеся фосфор, марганец, кремний, сера и другие элементы. При этом количество чугуна возрастает.

Когда чугун проходит перед фурмами в верхней части горна, где происходит горение топлива и присутствует кислород дутья, он окисляется. Окисляются примеси (кремний, марганец, фосфор) и частично железо:



Окислившиеся элементы переходят в шлак. При этом и чугун, и шлак разогреваются за счет высоких температур в зоне горения и за счет тепловых эффектов реакций окисления. Однако, как только

капли чугуна и шлака пройдут окислительную часть фурменной зоны, они вновь попадают в восстановительную атмосферу и при стекании их по раскаленным кускам кокса окислившиеся элементы быстро восстанавливаются по соответствующим реакциям прямого восстановления. Когда капли чугуна проходят чрез слой шлака в горне печи ниже воздушных фурм, из него удаляется сера.

Важнейшей характеристикой качества и свойств чугуна является его химический состав, однородность состава, количество неметаллических включений и растворенных газов. О химическом составе было сказано выше при рассмотрении сортамента чугунов и стандартов на выплавляемые марки чугунов.

Неметаллические включения в чугуне представлены тугоплавкими оксидами, карбонитридами, сульфидами и фосфидной эвтектикой. Оксидные включения — это FeO , SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO и т. п., количество которых составляет примерно 0,0035–0,023 % (обычно находится в пределах 0,006–0,008 %). Наличие карбонитридов обычно связано с присутствием титана. Их количество достигает 0,01–0,04 %. Сульфидных включений обычно бывает 0,01–0,02 %. В виде таких включений может находиться до 20 % серы, содержащейся в чугуне.

2.7. Процессы шлакообразования

Шлак — это оксидная система, которая является продуктом плавления пустой породы рудного материала, флюса и золы кокса. В состав доменного шлака входят оксиды кремния, кальция, магния, алюминия, сульфиды металлов, а также небольшие количества монооксида железа и марганца (FeO , MnO).

Процесс шлакообразования протекает в несколько этапов и при плавке природных руд начинается с *твердофазного минералообразования*. При нагревании многофазных систем еще в твердой фазе могут образоваться химические соединения, температура плавления которых ниже, чем температура плавления составляющих их оксидов. Образование химических соединений сопровождается выделением тепла, называемым тепловым эффектом шлакообразования. В основе этих химических соединений находятся, как правило, 5 оксидов: FeO — SiO_2 — CaO — Al_2O_3 — MnO .

Конкретный состав продуктов твердофазных реакций, протекающих при образовании шлака, зависит от температур и состава шихтовых материалов. При нагревании до 800–1200 °С такие легкоплавкие соединения могут образовывать жидкую фазу, в то время как весь материал еще находится в твердом виде. В результате этого происходит спекание, то есть физическое слипание частиц оксидов.

Как при твердофазном спекании, так и при спекании с участием жидких фаз (расплава) происходит уменьшение пористости рудных материалов (за счет зарастания пор), пропитка пор расплавом, образование манжет из расплава и обволакивание рудных кусков расплавом. Данное явление затрудняет доступ восстановительного газа к невосстановленным оксидам железа, замедляя ход восстановительного процесса.

При плавке агломерата и окатышей — продуктов предварительной подготовки руд к плавке — этап твердофазного спекания проходит в ходе процессов окускования; в этих железорудных материалах легкоплавкие соединения уже сформированы.

С повышением температуры происходит *размягчение железорудных материалов*. Данный процесс следует за спеканием или совершается одновременно с ним. При размягчении неизбежно оплавление хотя бы незначительного участка рудного материала (появление жидкой фазы), что вызывает ослабление внутренних сил сцепления частиц рудного материала, делает возможной деформацию куска. Усадка слоя материалов приводит к снижению пористости и сокращению объема межкусковых пространств.

При достижении определенных температур (1150–1200 °С) размягчившееся вещество переходит в текучее, подвижное состояние, то есть *образуется жидкий шлак*, который внедряется между кусками кокса и препятствует движению газов, что в свою очередь тормозит процессы восстановления.

В зависимости от интенсивности протекания размягчение может быть быстрым или проходить на большом участке по высоте печи и в большом температурном интервале. Чем шире температурный интервал размягчения, тем большую часть печи по высоте занимает вязкая непроницаемая для газов масса, заполняющая пустоты между кусками кокса, что затрудняет движение газа вверх и распределение их по сечению печи. Поэтому интервал размягчения должен быть как можно более узким. Температурный интервал шлакообразования

определяется температурой начала размягчения железорудных материалов и температурой расплавления шлака.

Температура начала шлакообразования определяется содержанием оксида железа: чем больше FeO в шлаке, тем ниже температура его плавления и тем на более высоких горизонтах печи начнется процесс шлакообразования. Содержание FeO зависит от соотношения восстановимости железорудного материала, содержания железа в нем и степени тугоплавкости пустой породы железорудного материала. Максимальное количество FeO будет в том случае, когда железорудный материал имеет высокое содержание железа, трудновосстановим, а пустая порода легкоплавка. В этом случае до начала образования шлака останется много неуспевшего восстановиться FeO . Если материал имеет низкое содержание железа, легковосстановим, а его пустая порода тугоплавка, то в первичном шлаке будет мало FeO . При других сочетаниях данных свойств содержание FeO в первичном шлаке будет средним по сравнению с рассмотренными крайними случаями. Температура полного расплавления шлака определяется составом получившегося шлака. Таким параметром можно управлять, добавляя флюсующие материалы.

По мере опускания шихтовых материалов в печи образуются первичные, промежуточные и конечные шлаки, отличающиеся по количеству, составу и свойствам и имеющие разное значение для процесса получения чугуна.

Первичный шлак — это первый подвижный расплав, образующийся в печи на поверхности или внутри кусков размягченного железорудного материала, при расплавлении наиболее легкоплавких химических соединений или смесей эвтектического состава. Первичного шлака образуется немного, особенностью его химического состава является высокое содержание FeO (20–40 %) и относительно высокая основность (в сравнении с основностью конечного шлака).

В процессе движения первичного шлака он нагревается, при повышении температуры в нем растворяется все большее количество ранее не растворившихся SiO_2 , Al_2O_3 , CaO и MgO железорудных материалов, в ходе процесса прямого восстановления снижается количество FeO , в шлак переходит некоторое количество золы кокса, углерод которого участвует в прямом восстановлении и образуется *промежуточный шлак*. Количество шлака увеличивается и несколько снижается его основность. Содержание FeO в промежуточных шлаках менее 0,5 %.

При попадании промежуточного шлака в горн печи состав шлака формируется окончательно — образуется *конечный шлак*. Процесс формирования конечного шлака характеризуется следующим: в шлак переходит основная масса золы кокса, сгорающего у фурм. При этом количество шлака увеличивается и основность шлака становится равной заданной. Здесь же (в горне печи) при взаимодействии со шлаком капелек проходящего через него чугуна окончательно переходит в шлак сера. Восстановление марганца и кремния, протекающее в горне печи, приводит к снижению содержания их оксидов в шлаке.

Таким образом, скапливающийся в горне над чугуном шлак приобретает свой окончательный состав. Состав шлака должен обеспечить его определенные свойства. Состав доменного шлака определяется видом выплавляемого чугуна, химическим составом шихтовых материалов, принятой технологией доменной плавки и другими факторами. Средний состав конечных доменных шлаков, %:

CaO.....	35–50
SiO ₂	35–45
Al ₂ O ₃	5–20
MgO.....	1–10
MnO.....	0,5–2,5
FeO.....	0,3–0,8
S.....	0,5–1,5

Свойства шлака. Основными физико-химическими свойствами доменного шлака являются:

1. Температура плавления шлака.

Шлак — многокомпонентная оксидная система, состав которой меняется по мере его опускания в печи. Плавление этой системы происходит в интервале температур.

Температура начала плавления шлака определяется составом пустой породы и содержанием FeO в первичном шлаке. Она совместно с температурой начала плавления пустой породы железорудных материалов определяет температурный интервал зоны вязко-пластичного состояния.

Температура шлака на выпуске должна обеспечивать его хорошую текучесть. Чем выше температура плавления конечного шлака, тем необходимы более высокие температуры для его расплавления и перегрева для обеспечения хорошей текучести и тем выше удельный расход кокса.

2. Вязкость шлака.

Вязкость шлака определяет механические процессы доменной плавки — газодинамику доменной печи. Вязкие шлаки ухудшают газодинамику в печи. Для снижения вязкости требуются более высокие температуры, а это в свою очередь требует повышенного расхода кокса. От жидкоподвижности шлака зависит также характер движения шлаков при выпуске продуктов плавки.

3. Сульфидная емкость шлака.

Серопоглолительная (сероулавливающая) способность шлака определяет эффективность десульфурации чугуна.

Свойства шлака определяются его химическим составом. Так как шлак представляет собой многокомпонентную систему, трудно установить строгое количественное изменение свойств шлака при одновременном изменении содержания в нем нескольких составляющих. Учитывая, что основу шлака составляют три оксида: SiO_2 , Al_2O_3 , CaO (в сумме 85–90 %), о свойствах доменных шлаков можно судить по содержанию этих оксидов

Для оценки свойств 3-компонентных систем используют тройные диаграммы, характеризующие зависимость некоторых свойств системы от ее состава. При использовании тройных диаграмм состав реального многокомпонентного шлака предварительно пересчитывают на 3-компонентную систему. В соответствии с диаграммой температур кристаллизации шлаков (рис. 2.13) температура плавления доменных шлаков находится в диапазоне 1340–1500 °С (смотри на диаграмме область составов доменных шлаков).

Оптимальная температура доменного шлака, обеспечивающая его хорошую текучесть при выпуске, составляет менее 1500 °С, минимальная не превышает 1340–1350 °С.

Вязкость и текучесть — величина обратная вязкости, характеризует подвижность шлака при данной температуре. Вязкость (динамическая) обусловлена внутренним трением, возникающим между отдельными слоями жидкости, перемещающимися с разными скоростями. Если сила в 1 Н изменяет разность скоростей двух слоев жидкости поверхностью 1 м² на 1 м/с, то вязкость жидкости равна 1 Н·с/м² или 10 пуазам.

Вязкость шлаков определяют по диаграммам вязкости 3-компонентных систем (рис. 2.14).

Вязкость шлака определяется его составом и зависит от температуры. Известно, что для гомогенных жидкостей зависимость вязкости от температуры описывается уравнением Ньютона

$$\eta = A \exp\left(\frac{E}{RT}\right),$$

где η — вязкость шлака, Па·с; E — энергия активации вязкого течения, кДж/моль; T — температура шлака, К; A — постоянная (зависит от состава шлака); R — газовая постоянная, кДж/(моль · К).

Характер зависимости вязкости шлака от температуры — поли-термы вязкости, определяется составом шлака. Шлаки первого типа (более кислые), изменяющие вязкость в широком интервале температур, называют длинными шлакам, а второго типа, резко изменяющие вязкость при незначительном изменении температур — короткими (рис. 2.15). Длинные шлаки являются устойчивыми по вязкости, а короткие — неустойчивыми.

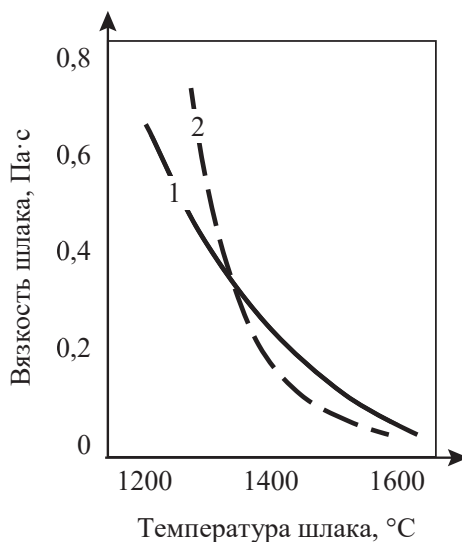


Рис. 2.15. Политерма вязкости:

1 — кислый шлак; 2 — основной шлак

Шлак является многокомпонентной гетерогенной системой. В реальном шлаке могут находиться твердые частицы (карбидные и карбонитридные образования, шпинели, коксовая мелочь, крошки огнеупоров и т. п.), которые также будут сгущать шлак, делать его ма-

лоподвижным. Поэтому понятие «вязкость шлака» имеет условное значение, а уравнение зависимости вязкости от температуры может быть использовано только в первом приближении. Но, как правило, для решения практических задач ведения доменной плавки этого достаточно.

Наличие других оксидов также влияет на вязкость шлака: FeO — снижает; MgO — до определенных значений снижает, а затем повышает; TiO_2 — снижает, но образование тугоплавкого, нерастворимого TiC приводит к возрастанию вязкости шлака.

Реальные доменные шлаки имеют вязкость 0,5–0,7 Па·с (5–7 пуаз). Оптимальная вязкость шлака на выпуске менее 0,5 Па·с (5 пуаз).

Сульфидная емкость шлака зависит от его состава, прежде всего соотношения основных и кислотных оксидов (основности), температуры в горне печи и характеризуется коэффициентом распределения серы между шлаком и чугуном (L_s). Зависимость L_s от состава шлака и содержания кремния в чугуне, косвенно характеризующего температуру в горне печи, приведена на рис. 2.16.

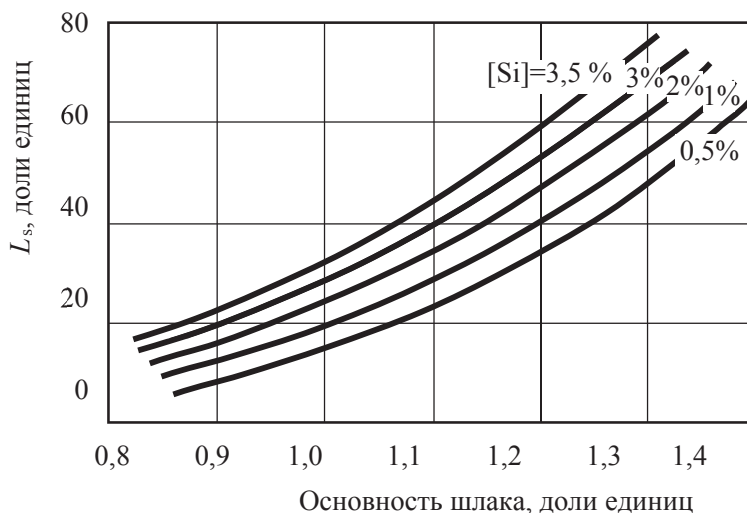


Рис. 2.16. Зависимость L_s от основности шлака и содержания кремния в чугуне (цифры у кривых)

Основность шлака является важной характеристикой состава шлака. Она должна обеспечить достаточную обессеривающую способность, жидкоподвижность шлака и нормальное тепловое состояние горна. Наилучшие свойства доменных шлаков достигаются при ос-

новности шлака 1,0–1,05, содержания Al_2O_3 от 8 до 12 % и содержания MgO до 10 %.

Для обеспечения требуемой основности шлака шихтовые материалы загружают в доменную печь в определенных соотношениях, установленных предварительным расчетом.

2.8. Горение топлива

При горении твердого топлива в доменной печи:

- выделяется тепло, необходимое для нормального протекания всех физико-химических процессов. В результате горения топлива в горне печи образуется область высоких температур и создаются условия для осуществления эндотермических процессов восстановления трудновосстановимых оксидов. Кроме того, продукты сгорания, нагретые до высоких температур, поднимаются, фильтруясь между кусками материалов и отдавая тепло материалам;
- образовавшийся в результате горения монооксид углерода играет роль восстановителя оксидов железа в вышележащих слоях шихтовых материалов;
- в процессе горения топлива освобождается пространство, в которое опускаются вышележащие материалы. От интенсивности горения топлива на горизонте фурм зависит скорость опускания материалов, загружаемых на колошнике.

Процессы, протекающие при горении топлива, определяют роль твердого топлива (кокса) в доменной печи как теплоносителя и восстановителя.

Еще одна функция кокса в доменной печи — разрыхлитель. Данная функция связана с процессами формирования столба шихтовых материалов. Куски кокса всегда больше кусков железорудных материалов (25–80 и 5–40 мм соответственно), что позволяет снизить газодинамическое сопротивление шихты потоку газа в верхней части печи. В нижней части печи кокс формирует так называемую коксовую насадку, по которой стекают сформированные из железорудных материалов чугун и шлак.

Горение в доменной печи протекает при большом избытке углерода и недостатке кислорода, что определяет следующие особенности горения топлива в доменной печи:

1. Продуктом реакции является восстановительный газ (CO).

Процесс горения топлива у фурм доменной печи можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 2.17.

Горение протекает последовательно в две стадии.

У самого среза фурмы, из которой дутье поступает в рабочее пространство доменной печи, имеется избыток кислорода, поэтому горение углерода кокса идет по реакции полного горения:

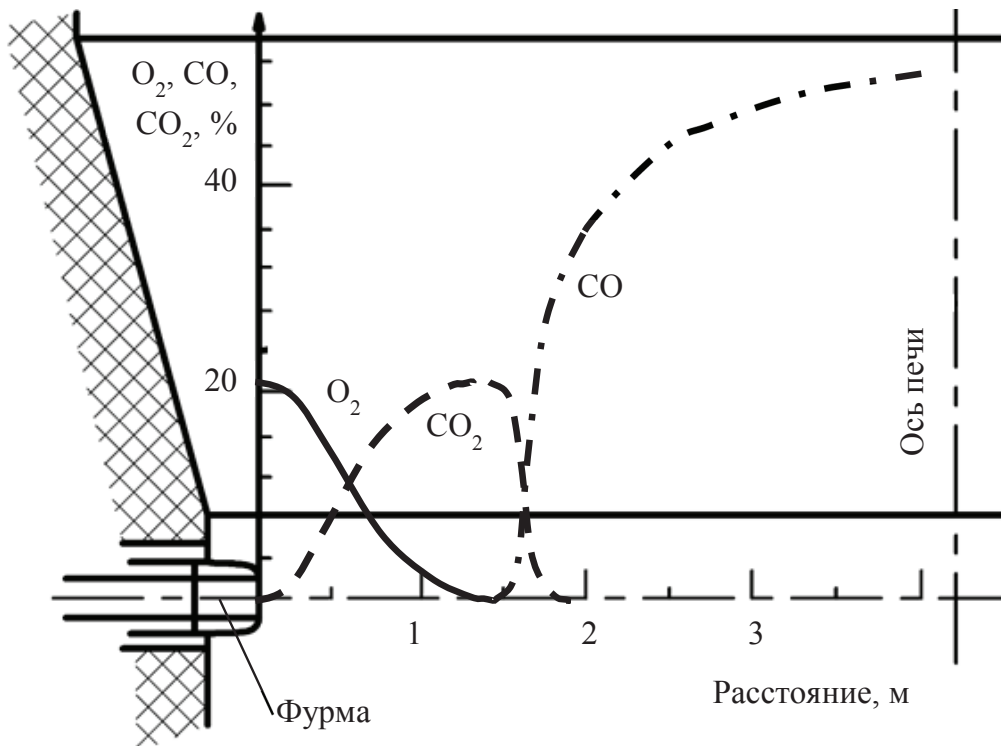
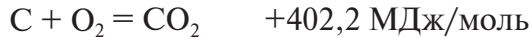


Рис. 2.17. Схема изменения состава газа по оси фурмы

По мере удаления от фурмы содержание кислорода в газе уменьшается в связи с затратами его на горение, а содержание CO_2 возрастает. На расстоянии примерно 0,9–1,5 м от фурмы содержание CO_2 в газе достигает максимума, а кислород из газовой фазы исчезает. С этого момента начинается процесс взаимодействия CO_2 с углеродом кокса по реакции



Данная реакция сопровождается поглощением значительного количества тепла. В связи с ее протеканием содержание CO_2 в газе снижается, а содержание CO увеличивается. На расстоянии 1,2–1,8 м от среза фурмы содержание CO_2 становится равным нулю и горение прекращается.

Таким образом, горение углерода кокса в доменной печи можно представить как суммарный процесс протекания реакций полного горения углерода и реакции газификации углерода кокса. Результирующая реакция — реакция неполного горения углерода:



Конечным продуктом реакции неполного горения углерода является CO .

2. Горение протекает в ограниченном пространстве, называемом зоной горения, окислительной зоной, очагом горения, фурменным очагом, что позволяет определить состав и температуру продуктов горения.

Продукты горения, выходящие из его зоны, называются горновым газом.

При вдувании 1 м^3 атмосферного воздуха в качестве дутья в печь поступает $0,79 \text{ м}^3$ азота и $0,21 \text{ м}^3$ кислорода. Кислород, взаимодействуя с углеродом, образует $0,42 \text{ м}^3 \text{ CO}$. Всего образуется $1,21 \text{ м}^3$ горнового газа.

Состав горнового газа: $0,42/1,21=35\% \text{ CO}$, $65\% \text{ N}_2$.

Исследования формы зон горения начались в 40-х годах XIX века. С тех пор выполнено много замеров, что позволило построить вертикальное и горизонтальное сечения фурменного очага. Зона горения в большей степени развита в вертикальном направлении, чем в горизонтальном. Зона (очаг) горения состоит из двух частей (рис. 2.18).

В первой (окислительной) части в газе при вдувании в печь сухого воздуха содержатся газы: O_2 , N_2 , CO_2 , во второй (восстановительной) — N_2 , CO_2 , CO . За пределами зоны горения в газе содержатся только CO и N_2 .

Дальнейшее изменение состава горнового газа за пределами фурменного очага связано с протекающими процессами прямого восстановления. Продуктом прямого восстановления является монооксид углерода, поэтому по направлению к оси содержание CO в газе возрастает.

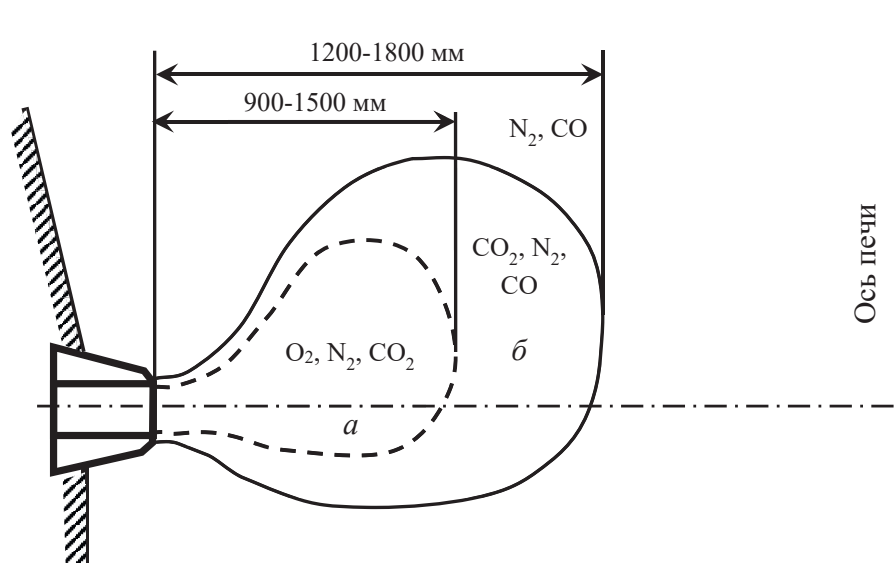


Рис. 2.18. Схема фурменной зоны:

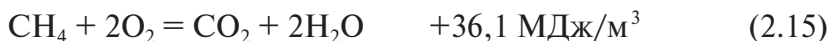
a — кислородная часть зоны горения; *б* — углекислотная часть зоны горения

Подаваемое в печь дутье всегда содержит какое-то количество паров воды. Пары воды в той части зоны горения, где CO_2 взаимодействует с углеродом, также взаимодействует с углеродом кокса:

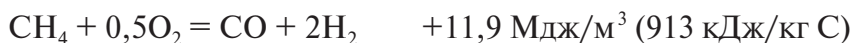


При этом образуется водород, входящий в состав горнового газа.

При вдувании в доменную печь природного газа, основной составляющей которого является метан, природный газ сгорает. Горение происходит в кислородной зоне фурменного очага:



Однако далее по оси фурмы, в той части зоны горения, в которой CO_2 и пары воды взаимодействуют с углеродом кокса, продукты горения природного газа превращаются в CO и H_2 . Эти реакции протекают с существенными затратами тепла. В конечном итоге процесс взаимодействия природного газа с дутьем протекает с незначительным тепловым эффектом:



Имея представление о протекающих реакциях и их тепловых эффектах, можно определить теплосодержание горновых газов.

Уравнение теплового баланса зоны горения:

$$c_{\Gamma} t_{\Gamma} V_{\Gamma} = Q_1 + c_{\text{д}} t_{\text{д}} V_{\text{д}} + c_{\text{к}} t_{\text{к}} + Q_2 m - Q_3 V_{\text{д}} \varphi_{\text{д}}, \quad (2.16)$$

где c_{Γ} , $c_{\text{д}}$, $c_{\text{к}}$ — теплоемкость горнового газа, кокса, дутья, кДж/(м³·°C); t_{Γ} , $t_{\text{д}}$, $t_{\text{к}}$ — температура горнового газа, дутья, кокса, °C; V_{Γ} — выход горнового газа, м³/т; $V_{\text{д}}$ — расход дутья, м³/т; Q_1 — тепловой эффект реакции неполного горения углерода кокса, кДж/т; Q_2 — тепловой эффект реакции конверсии природного газа, кДж/т; m — расход природного газа, м³/т; Q_3 — тепловой эффект реакции разложения паров воды углеродом, кДж/т; $\varphi_{\text{д}}$ — влажность дутья, г/м³.

По уравнению теплового баланса процесса горения (2.16) может быть вычислена теоретическая температура горения — температура газа, выходящего из зоны горения (на ее границе):

$$t_{\Gamma} = \frac{Q_1 + c_{\text{д}} t_{\text{д}} V_{\text{д}} + c_{\text{к}} t_{\text{к}} + Q_2 m - Q_3 V_{\text{д}} \varphi_{\text{д}}}{c_{\Gamma} V_{\Gamma}}.$$

Изменение температуры газа в зоне горения по оси фурмы показано на рис. 2.19.

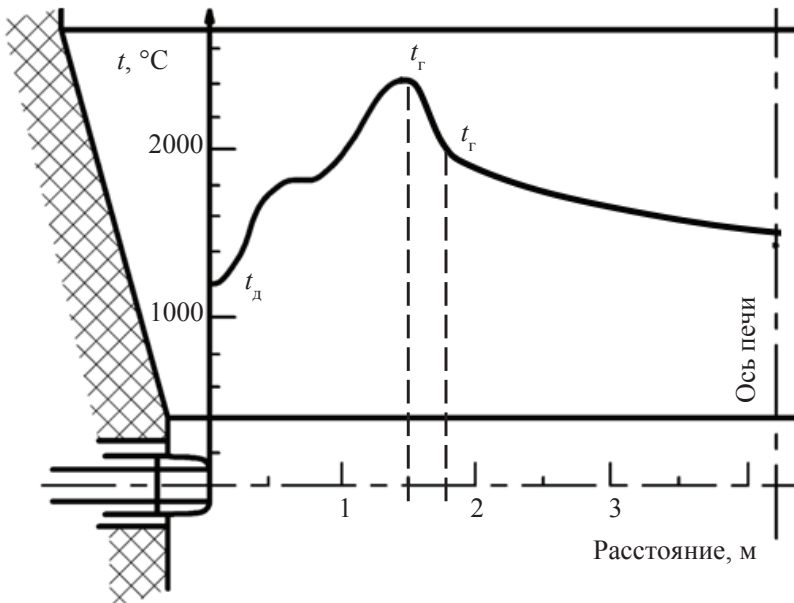


Рис. 2.19. Изменение температуры в зоне горения по оси фурмы

В кислородной части зоны горения температура газа по мере удаления от торца фурмы возрастает. В той точке, в которой содержание кислорода становится равным нулю, а CO_2 достигает максимального значения, температура газа возрастает до максимума. Данная точка называется фокусом горения ($t_{\text{ф}} = 2300 \dots 2500 \text{ }^\circ\text{C}$). Точнее говоря, это не точка, а выпуклая поверхность, ограничивающая кислородную часть зоны горения.

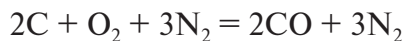
В восстановительной зоне горения, в которой CO_2 восстанавливается до CO за счет поглощения тепла, идущего на этот процесс, температура газа снижается. Теоретическая температура горения находится обычно в пределах $1900\text{--}2200 \text{ }^\circ\text{C}$. Граница зоны горения характеризуется минимальным содержанием CO_2 в горновых газах.

За пределами зоны горения температура снижается, так как тепло, которое несет газовый поток, затрачивается на нагрев находящихся там материалов и на покрытие затрат тепла на процессы, идущие с поглощением тепла (прямое восстановление, десульфурация).

В осевой части печи (в точке пересечения оси печи с осью фурм) температура должна быть не меньше $1500 \text{ }^\circ\text{C}$, в противном случае материалы там могут застыть с образованием так называемого «тотермана». Для этого из зоны горения в осевую часть горна должен поступать достаточно мощный газовый поток. Осевая часть печи должна иметь довольно высокую газопроницаемость, которая достигается загрузкой в нее относительно больших количеств кокса и меньших количеств рудных материалов.

3. Количество выгоревшего кокса пропорционально количеству подаваемого в печь дутья.

В дутье, содержащем 25 % кислорода, на каждый моль кислорода приходится 3 моля азота (75 %/25 %):



При сгорании 1 м^3 кислорода в реакцию вступает $32/22,4 = 1,43$ кг кислорода и соответственно выгорает $2 \cdot 12/22,4 = 1,07$ кг углерода.

Таким образом, чем больше дутья вдувается в доменную печь в единицу времени, тем больше в ней можно сжечь топлива и, как видно из уравнения, определяющего производительность печи ($P = K / k$), получить больше чугуна.

Повышение расхода дутья в единицу времени является основным требованием увеличения производительности печи. Изменение расхода дутья является средством целенаправленного изменения производительности печи.

2.9. Изменение количества и состава газа по высоте доменной печи

Изменение количества и состава газа по высоте доменной печи довольно полно отражает степень развития основных физико-химических процессов в различных частях печи. Схема изменения состава газа по высоте печи приведена на рис. 2.20.

Основное количество газа (N_2 , CO , H_2) образуется при горении топлива у фурм. При содержании кислорода в дутье 25 % в доменную печь поступает азот в количестве $0,75 \text{ м}^3/\text{м}^3$ дутья. В результате горения углерода на фурмах образуется монооксид углерода в количестве $0,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$ дутья.

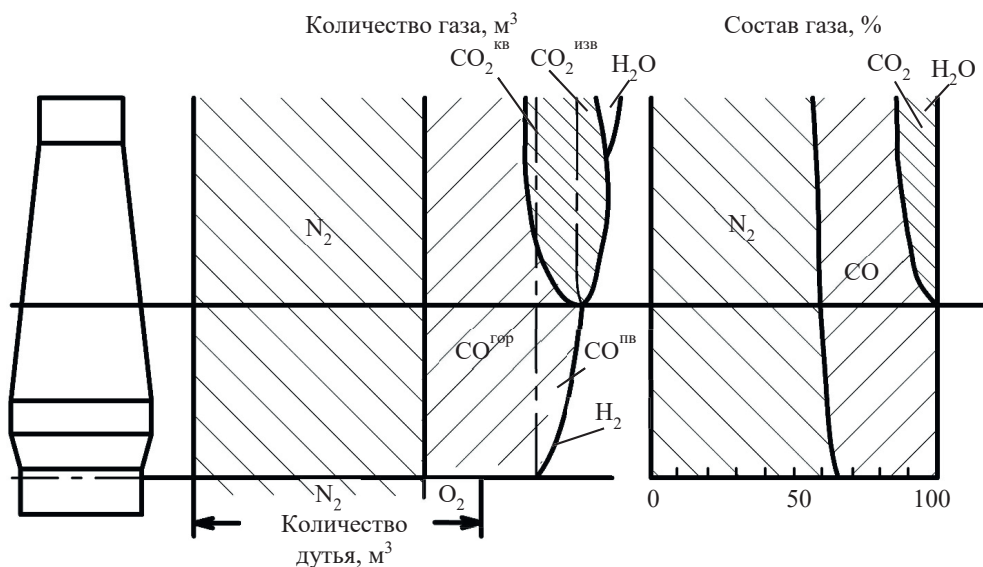


Рис. 2.20. Схема изменения состава газа по высоте печи

Количество водорода определяется влажностью дутья и расходом углеводородных добавок: при использовании природного газа в количестве 10 % от расхода дутья водорода образуется в количестве $0,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Примерный состав образующегося при горении топлива газа: 52–55 % N_2 ; 30–40 % CO ; 7–15 % H_2 . Азот — нейтральный газ, и его количество по высоте печи не меняется.

При движении продуктов горения вверх к ним присоединяется монооксид углерода, образующийся при прямом восстановлении оксидов железа и примесей чугуна. В зависимости от степени прямого восстановления железа количество CO увеличивается на величину $0,10\text{--}0,15 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

В верхней части печи, в зоне косвенного восстановления, количество газа может несколько увеличиваться только за счет разложения карбонатов, гидратов и испарения влаги. В этой части печи происходит, главным образом, изменение состава газа, прежде всего, здесь за счет процессов косвенного восстановления CO превращается в CO_2 .

Примерный состав колошникового (доменного) газа — газа, покидающего печь через колошник: 50–53 % N_2 ; 12–18 % CO_2 ; 20–28 % CO ; 1–3 % H_2 ; 1–3 % CH_4 .

Колошниковый газ содержит большое количество CO , поэтому используется в качестве топлива. Теплосодержание колошникового газа составляет приблизительно $3600\text{--}4000 \text{ кДж}/\text{м}^3$.

2.10. Тепловые процессы доменной плавки

Теплообмен относится к числу основных процессов доменной плавки. Такое положение установилось не сразу. Долгое время теория доменного процесса была связана с исследованиями по кинетике восстановления, шлакообразования, по установлению тончайших связей между скоростями процессов и температурой, которая оказалась важным определяющим фактором. Распределение температуры в объеме печи (температурное поле) определяет скорость (полноту) и место (время) протекания основных процессов доменной плавки.

Закономерности изменения температур в шахте доменной печи, факторы, от которых зависят температурные поля и методы их расчета описывает металлургическая теплотехника. Теория теплообмена

в доменных печах, созданная Б. И. Китаевым, появилась как недостающее звено в теории доменного процесса, определяющее термодинамику и кинетику металлургических процессов.

Закономерности противоточного теплообмена. Доменная печь относится к противоточным теплообменникам. Течение процесса основано на противотоке горячих газов, поднимающихся снизу вверх, и движущихся навстречу им сверху вниз шихтовых материалов, а также образующихся из них чугуна и шлака. Схема противоточного теплообменника представлена на рис. 2.21.

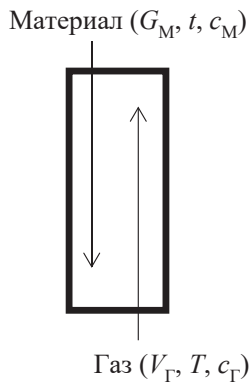


Рис. 2.21. Схема противоточного теплообменника

В теплообменник входит газ с температурой T , а выходит с температурой T'' . Расход газа составляет $V_Г$, а его теплоемкость $c_Г$. Шихта поступает в теплообменник с температурой t' , а выходит с температурой t'' . Расход шихты составляет G_M , а его теплоемкость c_M .

Рассмотрим противоточный теплообменник, высота которого достаточна для завершения теплообмена между потоками. Характер изменения температур потоков газа и материала определяется тепловым балансом в элементарном объеме теплообменника высотой dH

$$c_Г V_Г dT = c_M G_M dt$$

и уравнением теплообмена

$$dt c_M G_M = \alpha F (T - t) d\tau$$

где α — коэффициент теплопередачи, $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{град})$; F — площадь поверхности кусков материала, проходящего в единицу времени через слой высотой dH , $\text{м}^2/\text{мин}$; τ — время, мин.

Введем понятия теплоемкости потока газов $W_\Gamma = c_\Gamma V_\Gamma$ и теплоемкости потока шихты $W_M = c_M G_M$. Из уравнения теплового баланса видно, что характер изменения температур определяется отношением теплоемкостей потоков, участвующих в теплообмене:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{W_M}{W_\Gamma}.$$

Взаимное изменение температуры материалов и газов в зависимости от отношения теплоемкостей потоков приведено на рис. 2.22.

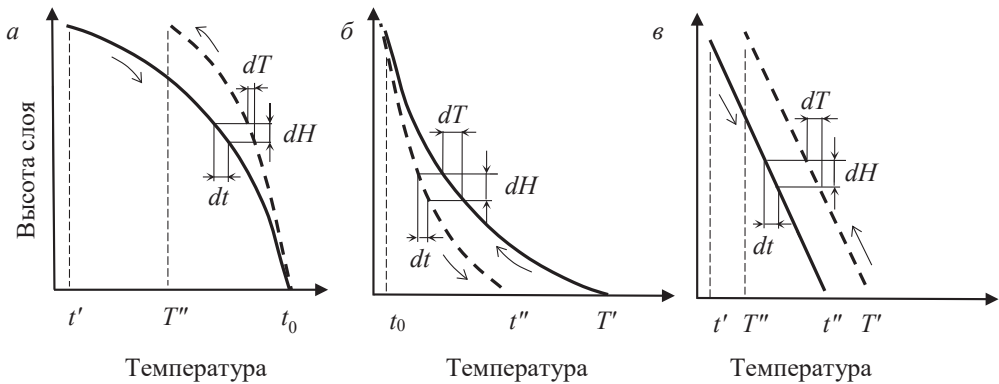


Рис. 2.22. Изменение температуры шихты и газов по высоте печи при разном отношении теплоемкости шихты и газов:

$a - W_M/W_\Gamma < 1$; $б - W_M/W_\Gamma > 1$; $в - W_M/W_\Gamma \approx 1$

В первом случае, когда ($W_M/W_\Gamma < 1$), температура газов изменяется в меньшей степени, чем температура материалов. Поток газов имеет большую теплоемкость. Его тепла хватит для того, чтобы нагреть поток материалов до температур равных температуре газа, с которой он вступает в теплообмен. Следовательно, при выходе из теплообменника в результате теплообмена поток материалов будет иметь температуру равную начальной температуре газов. В направлении движения газов разность температур потоков растет. Так как теплоемкость потока материалов меньше, то поток материалов не может отнять все тепло у потока газов, поэтому поток газов уходит из теплообменника с температурой выше начальной температуры материалов.

Во втором случае, когда $W_M/W_T > 1$, температура газов изменяется больше, чем температура материалов. Следовательно, разность температур ($T - t$) будет возрастать в направлении движения материалов. Поток материалов, имея большую теплоемкость, отбирает все тепло у газового потока, но не может нагреться до той температуры, с которой в теплообмен вступает газ. Газовый поток в процессе теплообмена остывает до температуры, с которой материалы вступают в теплообмен.

Третий случай теплообмена, когда $W_M/W_T \approx 1$, характеризуется тем, что изменение температуры материалов равно изменению температуры газов. Следовательно, изменение температур по высоте теплообменника описывается параллельными прямыми линиями. Угол наклона прямых зависит от условий теплообмена (коэффициента теплопередачи, площади поверхности кусков, скорости материалов).

Закономерности теплообмена в доменной печи. Доменная печь имеет очень большую высоту рабочего пространства, где происходит теплообмен между газовым потоком и шихтовыми материалами. Большую величину имеет и теплообменная поверхность, коэффициент теплопередачи также значителен из-за большой скорости движения газового потока и сильной его турбулизации. Все это обуславливает большую интенсивность теплообмена и его завершенность. Однако температуры газов и материалов в доменной печи не выравниваются ни на входе, ни на выходе газового потока из теплообменника.

Фактические температуры материалов и газов на входе и выходе из доменной печи имеют следующие значения: температура горения кокса у фурм, то есть температура горновых газов, с которой они входят в теплообмен, составляет 1900–2200 °С, средняя температура продуктов плавки равна 1400–1500 °С. Температура колошниковых газов равна 150–350 °С. Материалы в печь загружаются с температурой 20–30 °С.

Исходя из этих данных можно предположить, что, несмотря на благоприятные условия, теплообмен в доменной печи не является завершенным. Над разгадкой этого очевидного парадокса работали многие крупные ученые — металлурги-доменщики и теплотехники, но правильную, четкую модель теплообмена в шахтных печах удалось создать ученым кафедры металлургических печей Уральского государственного технического университета под руководством профессора Б. И. Китаева. Было установлено, что приведенный па-

радокс обусловлен следующей особенностью теплообмена в доменных печах.

В доменной печи происходит не просто теплообмен между газом и шихтой, а одновременно получают развитие физико-химические процессы, сопровождающиеся значительными тепловыми эффектами. Для учета тепловых эффектов таких процессов Б. И. Китаевым введено понятие кажущейся теплоемкости материалов.

Кажущаяся теплоемкость определяется как сумма физической теплоемкости материалов шихты $c_{ш}$ (количества тепла, необходимого для нагрева единицы вещества на один градус) и тепловых эффектов реакций, в которых участвуют шихтовые материалы:

$$c_{\text{каж}} = c_{ш} \pm \frac{dQ}{dt}.$$

В доменной печи соотношение теплоемкостей потоков газа и материалов, от которого зависит ход теплообмена, не остается постоянным, а меняется по высоте (рис. 2.23). Такое изменение усложняет картину теплообмена и определяет приведенные выше его особенности в доменной печи.

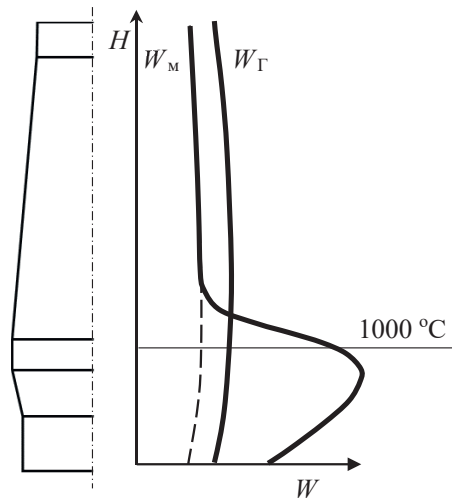


Рис. 2.23. Изменение теплоемкостей потоков газа и материала по высоте печи

Теплоемкость газового потока при изменении температуры по высоте печи почти не меняется. Удельная теплоемкость газового потока с ростом температуры возрастает, но количество газа и содержание

в нем трехатомных компонентов (CO_2 и H_2O), обладающих большей теплоемкостью, уменьшается. Эти два фактора практически компенсируют друг друга, в результате теплоемкость газового потока остается почти постоянной по всей высоте доменной печи.

В отличие от теплоемкости газового потока, теплоемкость потока материалов по высоте доменной печи меняется существенно.

В верхней части печи при невысоких температурах она также меняется мало, т. к. уменьшение массы материалов в результате физико-химических процессов (разложения гидратов и удаления влаги, диссоциации карбонатов, косвенного восстановления) компенсируется увеличением удельной теплоемкости при повышении температуры.

Начиная с горизонтов, где температура достигает $700\text{--}800^\circ\text{C}$, а особенно $900\text{--}1000^\circ\text{C}$ за счет протекающих в этой зоне эндотермических процессов (разложение карбонатов, плавление чугуна и шлака и, в первую очередь, реакция прямого восстановления оксидов железа), происходит резкое увеличение кажущейся удельной теплоемкости материалов, а следовательно, и теплоемкости их потока.

При температуре $\approx 900^\circ\text{C}$ теплоемкости потоков становятся равными, а при более высоких температурах теплоемкость потока материалов становится значительно выше теплоемкости газового потока. Таким образом, в отличие от большинства противоточных теплообменников соотношение теплоемкостей потоков в доменной печи меняется по высоте.

Указанное изменение соотношения теплоемкостей потоков в доменной печи приводит к S-образному изменению температур по высоте печи (рис. 2.24).

Общепризнанно, что теплообмен между потоками шихтовых материалов и газов в доменной печи осуществляется последовательно в двух зонах (верхней и нижней), разделенных зоной замедленного теплообмена — «холостой» зоной.

Зона замедленного теплообмена, разделяющая зоны активного теплообмена, характеризуется отношением теплоемкостей потоков шихты и газа $W_{\text{м}}/W_{\text{г}} \approx 1$. Верхняя ступень теплообмена имеет $W_{\text{м}}/W_{\text{г}} < 1$, а нижняя $W_{\text{м}}/W_{\text{г}} > 1$.

Название зоны замедленного теплообмена «холостой» правомерно только с точки зрения теплообмена, так как все другие процессы (восстановление, шлакообразование и др.) там не прекращаются.

В зоне замедленного теплообмена складываются наиболее благоприятные условия для косвенного восстановления оксидов железа.

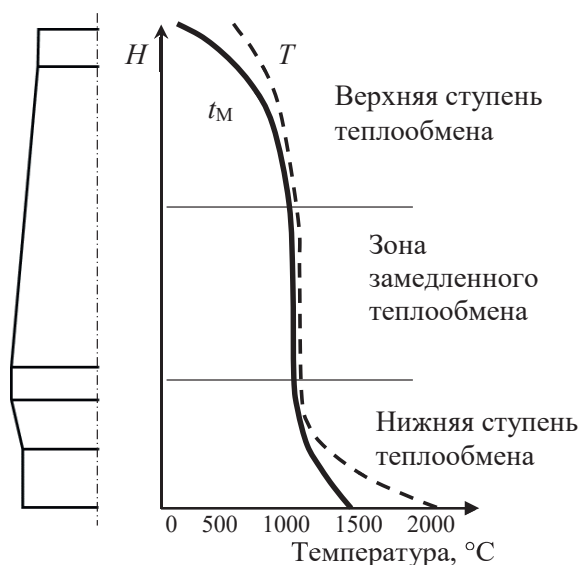


Рис. 2.24. Температурное поле доменной печи

Граница раздела зон теплообмена проходит по изотермической поверхности, температура которой соответствует температуре развития реакции газификации углерода кокса диоксидом углерода (конкретной для каждой технологии), которая составляет 900–1000 °С. При этом разность температур материалов и газов на границе зон составляет 20–50 °С.

Отсюда следует важный вывод — в верхней и нижней зонах теплообмен завершен, зоны теплообмена работают автономно, независимо друг от друга.

Верхняя тепловая зона определяет интенсивность развития процессов косвенного восстановления, а нижняя — затраты тепла на прямое восстановление, физический и химический нагрев продуктов плавки.

С изменением условий плавки температурное поле печи меняется. При оценке влияния параметров плавки на температурное поле печи, учитывая автономность работы верхней и нижней зон теплообмена, необходимо рассматривать влияние параметров на каждую зону.

2.11. Закономерности движения шихтовых материалов

Получение высоких технико-экономических показателей работы печи возможно лишь при благоприятном сочетании физико-химических и механических процессов, протекающих в объеме печи. К механическим процессам относят процессы движения газов и материалов.

Процессы газодинамики и механики движения материалов из-за важности их удовлетворительного развития являются основной заботой производственного персонала доменной печи. Такие процессы являются лимитирующими при форсировании доменной плавки дутьем.

Вместе с тем, данные процессы являются слабоизученными, так как связаны с трудностями экспериментирования на реальных объектах, а также с трудностями изучения движения газов и материалов на моделях.

Прежде чем рассматривать закономерности движения материалов, рассмотрим, что собой представляет доменная шихта.

Понятие сыпучего тела. Доменная шихта, составленная из разнородных твердых кусков топлива и железорудных материалов, относится к категории сыпучих тел.

Сыпучее тело — совокупность мелких, твердых частиц лишенных или имеющих бесконечно малое сцепление между собой и бесконечно малых в сравнении со всем объемом тела.

По некоторым свойствам сыпучее тело аналогично жидкости: по характеру сопротивления сжатию и растяжению, по возможности истечения в сторону наименьшего давления, по заполнению внутреннего объема сосудов. Принципиальное отличие сыпучего тела от жидкости заключается в значительном трении сыпучего тела о стенки сосуда и одних частиц о другие. И как следствие, сыпучее тело обладает малой подвижностью. Его поверхность в нормальных условиях наклонена к горизонту под некоторым углом — углом естественного откоса. Важнейшими параметрами сыпучего тела являются его структура, характеризующая плотность упаковки частиц (k , м³/м³), порозность (ϵ , м³/м³), насыпную массу ($\gamma_{\text{нас}}$, кг/м³), коэффициент внутреннего трения (ϕ). Данные характеристики связаны между собой следующими соотношениями:

$$k = 1 - \varepsilon,$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\gamma_{\text{нас}}}{\rho_{\text{каж}}},$$

где $\rho_{\text{каж}}$ — кажущаяся плотность, равная плотности данного материала, без учета пор, кг/м³.

Порозность — одна из важнейших характеристик сыпучего тела, определяется отношением объема межкусковых каналов к общему объему сыпучего тела.

Величина порозности слоя, составленного из шаров равного диаметра, зависит от их взаимного расположения. Расположение шаров в слое колеблется между двумя крайними положениями, из которых одно соответствует теснейшему расположению шаров (ромбическая укладка), а второе — наиболее свободному расположению шаров при условии их касания (кубическая укладка).

Порозность слоя в данном случае определяется по формуле Слихтера

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi}{6(1 - \cos\Theta)\sqrt{(1 + 2\cos\Theta)}}, \quad (2.17)$$

- при кубической укладке $\Theta = 90^\circ$, $\varepsilon = 0,476$;
- при ромбической укладке $\Theta = 60^\circ$, $\varepsilon = 0,259$.

Таким образом, исходя из теоретических предпосылок, порозность слоя, составленного из шаров равного диаметра, колеблется в пределах 0,256–0,476. Из уравнения (2.17) следует также, что порозность слоя не зависит от диаметра шаров, а определяется только их расположением.

Если слой состоит из шаров различного диаметра, то порозность зависит как от расположения шаров, так и от диаметров различных фракций, а также от соотношения количеств шаров различных фракций. В этом случае порозность слоя может быть меньше минимальной за счет заполнения межкусковых пространств более мелкими шарами.

Порозность слоя шихты определяется ее гранулометрическим составом. На рис. 2.25 представлена схема, которая поясняет влияние соотношения диаметров мелких и крупных частиц на порозность слоя.

Чем существеннее разница диаметров кусков, тем существеннее влияние мелочи (рис. 2.26).

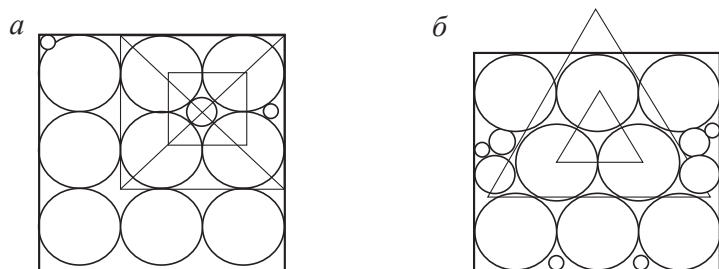


Рис. 2.25. Схема для оценки влияния соотношения мелких и крупных частиц на порозность слоя:

а — кубическая укладка; *б* — ромбическая укладка

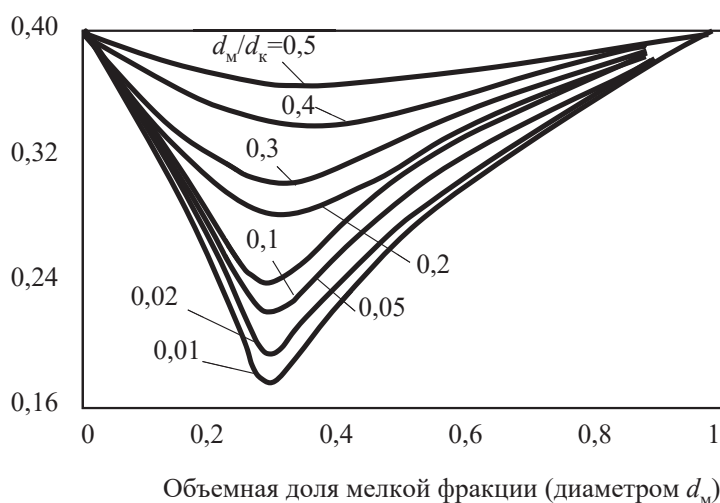


Рис. 2.26. Зависимость порозности 2-компонентной смеси от доли мелкой фракции

Загружаемые в доменную печь материалы с точки зрения влияния их на движение газа в печи можно разделить на две группы: рудные материалы (руды, агломерат, известняк, добавки) и топливо (кокс). Рудные материалы в отличие от топлива имеют меньший размер кусков и содержат мелочь. Ниже приведен примерный гранулометрический состав агломерата и кокса, %:

агломерат:

размер фракции 25—40 мм	27,7
10—25 мм	39,5
5—10 мм	28,6
менее 5 мм	4,2

кокс:

размер фракции более 80 мм.....	18,2
80—60.....	41,9
60—40.....	33,4
40—25.....	3,8
менее 25	2,8

В литературе приводятся зависимости, определяющие характеристики слоя в зависимости от гранулометрического состава шихтовых материалов.

Причины плавного и непрерывного движения материалов. Доменный процесс характеризуется плавным и непрерывным движением шихты. Загрузка шихтовых материалов осуществляется периодически. Каждые 10 мин срабатывает большой конус засыпного устройства загрузочного аппарата и шихтовые материалы подаются в печь. Выпуск продуктов плавки — это тоже периодический процесс. По мере накопления продуктов плавки, приблизительно 1 раз в час, чугун и шлак выпускаются из печи через чугунную лётку. Плавное и непрерывное движение шихты обеспечивается тем, что при сжигании углерода кокса высвобождается пространство, в которое опускаются вышележащие слои шихтовых материалов. Процесс горения — непрерывный процесс, приводящий к уменьшению объема материалов, является первым по значимости фактором, обеспечивающим плавное и непрерывное движение шихтовых материалов.

Перечислим процессы, которые тоже приводят к уменьшению объема материалов.

При плавлении железорудной части шихты образуются чугун и шлак. Плотность продуктов плавки выше, чем насыпная масса железорудных материалов. Следовательно, при плавлении происходит уменьшение объема материала. Процесс плавления также является процессом непрерывным, вторым по значимости, обеспечивающим плавный, непрерывный характер движения материалов.

Другие непрерывные процессы, связанные с уменьшением объема материалов, — это восстановление оксидов железа, разложение гидратов, карбонатов, испарение влаги.

Дадим количественную оценку влияния основных факторов на процесс движения материалов.

Расход кокса на получение тонны чугуна составляет 0,45 т/т, насыпная масса кокса — 0,45 т/м³. Объем кокса на 1 т чугуна — 1 м³.

Для получения 1 т чугуна необходимо 1,7 т ЖРМ, насыпная масса ЖРМ 1,7 т/м³. Объем ЖРМ — 1 м³.

Таким образом, для получения 1 т чугуна необходимо 2 м³ шихты.

Один из материалов — кокс, практически полностью сгорая, превращается из твердого вещества в газ. При этом объем материалов уменьшается на 1 м³ или в 2 раза.

Рассчитаем объем плавильных материалов. Плотность чугуна 7 т/м³, плотность шлака 2,6 т/м³, выход шлака 0,3 кг/т чугуна. Объем, занимаемый продуктами плавки: $1/7 + 0,3/2,6 = 0,25$ м³/т. За счет плавления объем материалов уменьшается в 4 раза и составит 0,25 м³/т.

Следовательно, в результате горения топлива и плавления железорудных материалов общее изменение объема составит 1,75 м³/т. Уменьшение объема шихтовых материалов за счет процессов горения топлива и плавления железорудных материалов является необходимым условием движения материалов.

Характер движения материалов. Сложности движения материалов в доменной печи начинаются уже при их загрузке на колошнике. На большинстве доменных печей установлены двухконусные загрузочные устройства (рис. 2.27). В обычном положении оба конуса прижаты к воронке и чаше и надежно изолируют внутреннее пространство от атмосферы. После загрузки скипа в приемную воронку малого конуса последний опускается и в образовавшуюся щель шихта сыпается на большой конус. Малый конус закрывается. Аналогично производится загрузка материалов на большой конус еще из 2—3 скипов. Теперь при закрытом малом конусе опускается большой конус и порция шихты (подача) высыпается в печь. Сразу после освобождения от материалов большой конус закрывается. Шихтовые материалы, сыпаясь по опущенному конусу, падают к стенке и от нее по откосу сыпаются к оси печи.

Важным достижением в решении вопроса равномерного распределения материалов является разработка и применение на новых и реконструируемых печах безконусного загрузочного устройства (рис. 2.28).

Аппарат данного типа позволяет селективно распределять загружаемые шихтовые материалы по всей площади поперечного сечения колошника доменной печи с помощью вращающегося лотка с изменяемым углом наклона.

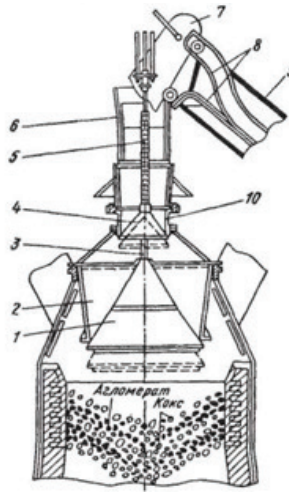


Рис. 2.27. Двухконусное загрузочное устройство¹:

1 — большой конус; 2 — воронка (чаша); 3 — штанга; 4 — малый конус; 5 — полая трубчатая штанга; 6 — приемная воронка; 7 — скип; 8 — рельсы наклонного моста; 9 — наклонный мост; 10 — вращающаяся воронка

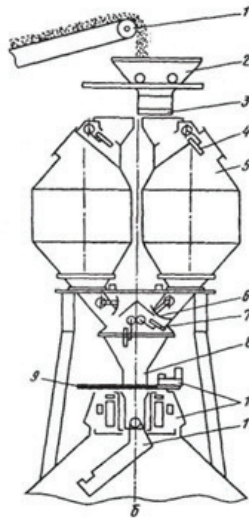


Рис. 2.28. Безконусное загрузочное устройство²:

1 — конвейер шихтоподачи; 2 — приемная воронка; 3 — затвор; 4 — верхний газоотсекающий клапан; 5 — бункер; 6 — затвор бункера; 7 — нижний газоотсекающий клапан; 8 — трубка; 9 — отсечная задвижка; 10 — механизм вращения лотка; 11 — вращающийся лоток

¹ <https://metallurgist.pro/domennaya-pech/>

² <https://metallurgist.pro/domennaya-pech/>

Вне зависимости от типа загрузочного устройства падение материалов происходит в присутствии восходящего потока газов. Вследствие разного веса кусков различно воздействие данного восходящего потока. Более легкие куски кокса в большей степени уравниваются движущимся снизу газом, чем более тяжелые куски рудных материалов. Такая ситуация приводит к расположению материалов на колошнике, как показано на рис. 2.29.

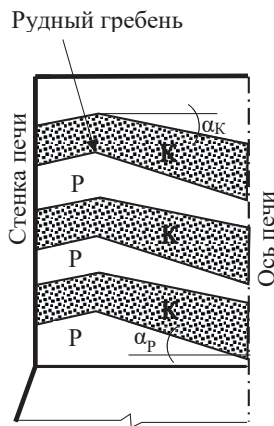


Рис. 2.29. Схема расположения материалов на колошнике:

Р — слой железорудного материала; К — слой кокса; α_r — угол откоса, образуемый рудными материалами; α_k — угол откоса, образуемый коксом

Угол откоса, образуемый рудными материалами, несколько больше угла откоса, образуемого коксом. Такое соотношение приводит к выкливанию слоев рудных материалов к оси печи. В месте расположения гребня, образующегося при ссыпании материалов с конуса, скапливается мелочь, а к основанию откосов скатываются более крупные куски.

Важной характеристикой структуры столба шихтовых материалов является рудная нагрузка — отношение массы ЖРМ к массе кокса. Распределение рудной нагрузки по сечению печи определяется многими факторами: системой загрузки, уровнем шихты в печи, величиной подачи и другими факторами, определяющими характер загрузки печи.

При движении материалов распределение их несколько меняется.

Движение шихтовых материалов в печи имеет ряд особенностей. Учитывая, что движение в основном происходит за счет горения топлива, материалы движутся в направлении зон горения, в которых непрерывно сгорает кокс и освобождается пространство (рис. 2.30).

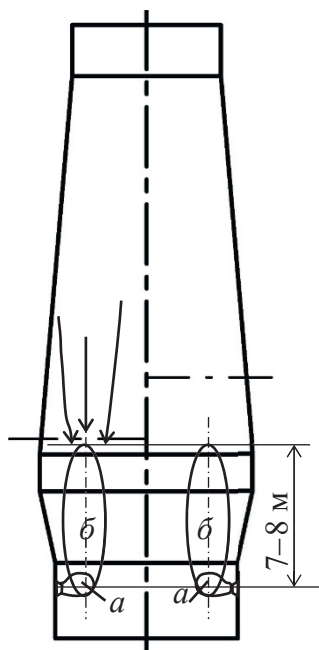


Рис. 2.30. К понятию эллипсоида разрыхления:
 a — фурменный очаг; b — эллипсоид разрыхления

Скорости движения материалов по мере приближения к фурменному очагу возрастают. Рост скорости вызывает разрыхление движущейся массы кусков. Ту область над фурмами, в которой происходит увеличение скорости движения материалов, называют эллипсоидом разрыхления. С этой точки зрения зоны горения можно в какой-то степени уподобить отверстиям, через которые из печи как бы «высыпаются» материалы. При этом надо иметь в виду, чем больше в доменную печь вдувается дутья, тем больше в единицу времени сгорает кокса и быстрее опускается шихта.

Принимая во внимание тот факт, что движение шихты происходит за счет плавления рудных материалов, необходимо отметить неравномерность скорости движения материалов по радиусу печи. Скорость движения шихты в различных точках сечения определяется значением рудной нагрузки в данной точке. Там, где больше ЖРМ, где больше рудная нагрузка, там имеет место большее уменьшение объема и, следовательно, большие скорости движения материалов (рис. 2.31).

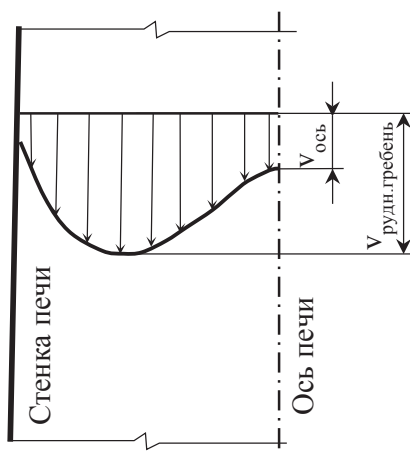


Рис. 2.31. Распределение скоростей движения материалов по радиусу печи

Траектории рудных материалов и кокса при движении их в осевой части печи одинаковы и близки к вертикальным линиям.

В периферийной части печи траектории движения кусков из-за расширения шахты и под действием давления лежащих в осевой части печи кусков отклоняются к стенке. Отклонение от вертикальной линии у легких кусков кокса значительно больше, чем у тяжелых кусков рудных материалов. Поэтому по мере опускания слои рудных материалов в какой-то степени выклиниваются по направлению к стенке. В связи с этим в нижней части шахты и в распаре у стенок скапливается относительно большее количество кокса.

Нижнюю часть печи (нижнюю часть шахты, распар, заплечики и горн) рудные материалы проходят в виде жидких продуктов плавки — чугуна и шлака, которые стекают каплями и струйками по межкусковым каналам опускающегося кокса. Наличие коксовой насадки обеспечивает противоточное движение материалов и газов в нижней зоне печи.

Тяжелый жидкоподвижный чугун стекает довольно быстро, заполняя при этом малую часть объема межкусковых каналов. Шлак легче, вязкость его значительно выше, поэтому стекает он со сравнительно небольшой скоростью, заполняя значительную часть объема межкусковых каналов. Скорость стекания его и степень заполнения им межкусковых пространств меняется с изменением вязкости: чем больше вязкость шлака, тем медленнее стекает он и в большей степени заполняет межкусковые каналы.

Высота зоны печи, в которой имеется жидкий шлак, зависит от температуры шлакообразования. Чем более легкоплавок первичный шлак, тем больше высота этой зоны.

В среднем шихтовые материалы проходят доменную печь за 5–7 часов.

2.12. Закономерности движения газов

Навстречу опускающейся шихте движется поток газа. Движение газа обеспечивается его избыточным давлением на входе. Газовый поток пронизывает столб шихтовых материалов, находящихся в различных агрегатных состояниях. При движении в слое шихты имеют место потери напора, то есть по мере движения газа в столбе шихтовых материалов наблюдается снижение его давления:

$$\Delta P = P_d - P_k,$$

где ΔP — перепад давления в печи, Н/м²; P_d — давление дутья, Н/м²; P_k — давление под колошником, Н/м².

В технике для описания газодинамики слоевых процессов применяется уравнение, предложенное Эргоном:

$$\Delta P = \lambda \frac{H}{d} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{w^2}{2} \rho \frac{P_0}{P} \frac{T}{T_0},$$

где λ — коэффициент сопротивления движению газового потока; H — высота слоя, м; d — эквивалентный диаметр кусков шихты, м; ε — порозность слоя шихты, доли ед.; w — скорость газа, рассчитанная на свободное сечение печи, м³/м²·с; ρ — плотность газа при нормальных условиях, кг/м³; P — среднее давление газа, н/м².

Очень большое влияние на потери напора при движении газа в доменной печи оказывает, как это видно из уравнения Эргона, размер кусков шихты и породность слоя.

Эквивалентный диаметр куска рассчитывается исходя из гранулометрического состава шихтовых материалов. Необходимо иметь в виду, что в верхней части шахты при восстановлении происходит разрушение кусков рудных материалов. Оно вызвано напряжениями, возни-

кающими вследствие изменения кристаллической структуры кусков при переходе высших оксидов в низшие оксиды и в железо. Таким образом, в верхней части печи происходит существенное уменьшение диаметра кусков шихты.

В нижней части печи шлак в большей или меньшей степени заполняет межкусковые каналы, уменьшая объем межкусковых каналов в слое шихты.

Если учесть изменение количества, температуры, давления газа и площади поперечного сечения печи по ее высоте, то изменение условной скорости газа можно представить в виде графика (рис. 2.32).

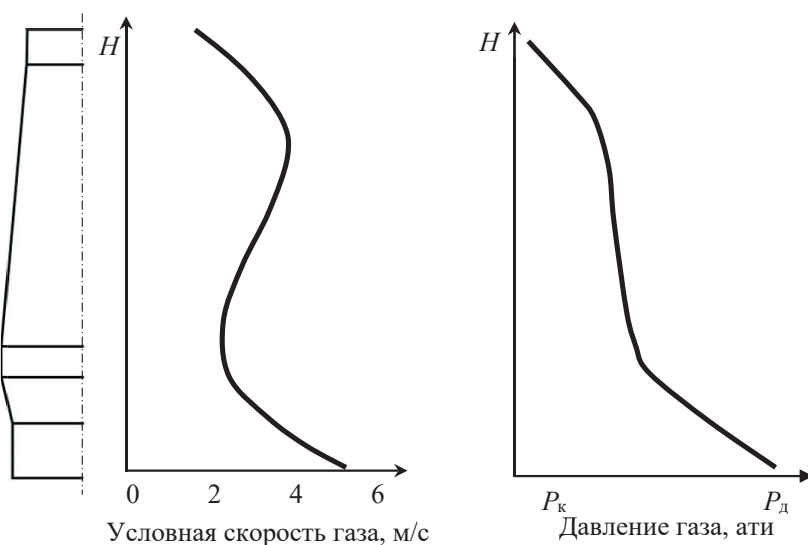


Рис. 2.32. Изменение условной скорости и перепада давления газа по высоте печи

Скорость газа в расчете на пустое сечение печи меняется от 1,5–2,0 м/с в нижней части шахты до 3–4 м/с в верхней части ее и в нижней части заплечиков. Действительная скорость движения газа в межкусковых каналах, конечно, выше.

Изменение диаметра кусков и объема межкусковых каналов, а также изменение скорости газа приводит к тому, что давление газа по высоте печи меняется неравномерно (рис. 2.32). Максимальный перепад давления по высоте печи имеет место в верхней части шахты и в нижней части заплечиков. Верхний перепад давления определяется снижением эквивалентного диаметра железорудных материалов за счет разрушения при их восстановлении. Нижний перепад давления свя-

зан со снижением порозности слоя шихтовых материалов, обусловленным плавлением железорудных материалов.

Поскольку рудные материалы и кокс распределяются в печи неравномерно, распределение газа по сечению печи также будет неравномерным. Там, где находится больше кокса, то есть у стенок и в осевой части печи, будет проходить больше газа. Там, где располагаются рудные материалы, газа будет проходить меньше. Минимальное количество газа будет проходить в месте расположения рудного гребня, где скапливается рудная мелочь.

Газ проходит печь за 4–10 с.

2.13. Условия ровного схода шихты

В доменной печи потоки шихты и газа находятся в противотоке и их встречное движение возможно только при соблюдении определенных условий, одним из которых является ровный сход шихтовых материалов. Ровный сход шихты — это плавное, непрерывное опускание материалов в печи без остановок и обрывов.

Рассмотрим соотношение сил, управляющих движением шихты в печи (рис. 2.33).

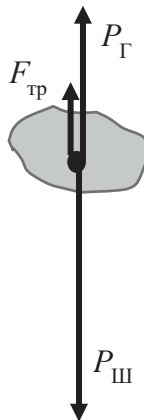


Рис. 2.33. Силы, действующие на кусок шихтового материала

Шихта в доменной печи опускается за счет силы тяжести, которая определяется по уравнению

$$P_{\text{ш}} = mg,$$

где $P_{\text{ш}}$ — вес шихты в печи, Н; g — ускорение свободного падения, м/с²; m — масса шихты, т:

$$m = Sh\gamma_{\text{ш}},$$

здесь S — площадь среднего поперечного сечения печи, м²; h — высота слоя шихты, м; $\gamma_{\text{ш}}$ — насыпная масса шихты, кг/м³.

Движению материалов препятствует поддерживающая сила газового потока P_{Γ} , Н:

$$P_{\Gamma} = \Delta P \cdot S,$$

и сила трения материалов $F_{\text{тр}}$, Н, о стенки печи и о малоподвижные материалы в осевой части горна, которая определяется профилем печи и свойствами материала.

При нормальном сходе шихты указанные силы связаны зависимостью

$$P_{\text{ш}} > P_{\Gamma} + F_{\text{тр}}.$$

Активный вес шихты P_a , Н, составит:

$$P_a = P_{\text{ш}} - P_{\Gamma} - F_{\text{тр}}.$$

Положительный активный вес шихты является условием равного схода шихтовых материалов. Определим, с помощью какой величины можно управлять движением материалов.

Вес шихты определяется полезным объемом печи $V_{\text{ш}}$ и насыпной массой шихтовых материалов — железорудных материалов и кокса ($\gamma_{\text{ш}}$, $\gamma_{\text{ЖРМ}}$, $\gamma_{\text{к}}$):

$$P_{\text{ш}} = mg = V_{\text{ш}}\gamma_{\text{ш}}g = V_{\text{ш}} \frac{\gamma_{\text{ЖРМ}} + \gamma_{\text{к}}}{2} g \approx 5000 \cdot \frac{1,7 + 0,45}{2} \cdot 9,81 = 52728.$$

Управлять весом шихты нельзя.

Силой трения также управлять нельзя.

Подъемная сила газового потока определяется перепадом давления по высоте печи ΔP и площадью среднего сечения рабочего пространства печи S :

$$P_{\Gamma} = \Delta P \cdot S.$$

Изменяя перепад давления газа по высоте печи, подъемной силой газового потока можно управлять.

В качестве технологического критерия активного веса шихты используют степень уравнивания шихты газовым потоком ($СУ, \%$) — отношение подъемной силы газового потока к весу шихты:

$$СУ = \frac{\Delta P}{9,81 H \gamma_{ш}} 100.$$

Степень уравнивания равная 55–60 % является предельной, сверх которой наблюдается переход ровного схода шихты в неровное движение материалов. Образование газовых полостей в локальных участках шихты с повышенной порозностью приводят либо к подвиганию и обрывам шихты, либо возникает канальный ход (такое явление, когда большое количество газа проходит через какой-либо участок печи).

Все факторы, влияющие на перепад давления в печи, а следовательно, и на условия схода шихты, можно разделить на две группы.

К первой из них относятся расход дутья и его температура. Расход дутья в единицу времени определяет интенсивность доменной плавки. На каждый 1 м^3 поступившего в печь дутья в ней сгорает и расходуется на другие процессы от 0,33 до 0,36 кг кокса. Таким образом, количество израсходованного в печи кокса пропорционально расходу дутья. Увеличение расхода дутья без нарушения ровного схода шихты приводит к повышению производительности печи. С повышением температуры дутья возрастают температуры в нижней части печи, что ведет к росту перепада давления газа в нижней части печи и, следовательно, к ухудшению условий схода шихты.

Ко второй группе факторов, влияющих на условия схода, относятся: содержание мелочи в шихтовых материалах, прочность топлива, количество, вязкость и температура образования шлака. Все эти факторы определяют сопротивление столба шихты движущемуся через него газу. Чем больше мелочи в материале, тем меньше диаметр его кусков и большее сопротивление он оказывает движущемуся газу. То же можно сказать и о прочности кокса: чем ниже она, тем больше измельчается кокс при опускании в печи, и в нижней части ее диаметр кусков шихты будет меньше. Это приводит к увеличению сопротивления столба шихты в нижней части печи движущемуся через нее газу. Увеличение количества и вязкости шлака приводит к уменьшению объема межкусковых каналов в нижней части печи, так как шлак, стекая по этим каналам, частично заполняет их. Чем выше вязкость шла-

ка, тем медленнее и более толстыми каплями и струйками он стекает. С уменьшением температуры образования шлака зона шлакообразования поднимается в более верхние горизонты. Таким образом, в доменной печи увеличивается высота зоны, в которой величина объема межкусковых каналов уменьшена. Увеличение количества, вязкости шлака и понижение температуры его образования повышает сопротивление столба материалов в печи.

Во всех рассмотренных случаях, когда сопротивление столба шихты в печи движущемуся через него газу возрастает, нарушение ровного схода шихты наступает при меньших расходах дутья и температурах его нагрева.

Для обеспечения высокоинтенсивной работы печи с высоким расходом дутья необходимо использовать качественные шихтовые материалы.

Контрольные вопросы к главе 2

1. Укажите последовательность восстановления оксидов железа по высоте доменной печи.
2. Запишите реакции прямого и косвенного восстановления оксидов железа.
3. Укажите температурные условия их протекания. Перечислите основные недостатки прямого восстановления.
4. Почему мы стремимся снизить степень прямого восстановления? Чем она определяется?
5. Почему мы стремимся повысить степень косвенного восстановления? Чем она определяется?
6. Результатом каких химических реакций является реакция прямого восстановления оксидов железа?
7. Запишите реакцию газификации. В составе какого восстановительного процесса она протекает?
8. В результате каких реакций в печи образуется водород? Какова его роль в доменном процессе?
9. Что такое восстановимость железорудных материалов, от чего зависит? Зачем необходимо повышать восстановимость?
10. Что такое реакционная способность кокса? Как она влияет на степень развития реакции косвенного восстановления?

11. Как влияет на восстановимость руды состав пустой породы ЖРМ?
12. Как влияет на степень косвенного восстановления состав газовой фазы? За счет каких мероприятий можно ее повысить?
13. Как влияют на степень косвенного восстановления условия процесса: температура, давление?
14. Сравните восстановление низших оксидов марганца и железа в доменной печи.
15. Укажите технологические условия, способствующие восстановлению марганца из его оксидов.
16. Запишите уравнение реакции восстановления оксида кремния. Какова степень восстановления кремния в доменной печи?
17. Укажите технологические условия, способствующие восстановлению кремния.
18. О чем свидетельствует увеличение содержания кремния в чугуне?
19. Укажите условия получения чистого по фосфору чугуна.
20. Назовите источники серы в доменной печи.
21. Назовите особенность процесса удаления серы из металла в доменной печи.
22. Опишите с помощью химических реакций процесс десульфурации чугуна в доменной печи.
23. Какими должны быть технологические условия для снижения содержания серы в чугуне?
24. Какие преимущества дает внедоменная десульфурация чугуна?
25. При каких температурах плавятся чистое железо и чугун? Что является причиной снижения температуры сплава?
26. Каковы источники доменного шлака и какие оксиды являются основой доменного шлака?
27. Назовите этапы образования шлака в доменной печи. Каково их значение для доменной плавки?
28. Какова роль реакции твердофазного минералообразования?
29. Перечислите особенности состава первичного доменного шлака.
30. Укажите примерный состав конечного доменного шлака.
31. Назовите основные свойства доменного шлака и их оптимальные значения.
32. Чем отличаются «длинные» и «короткие» шлаки?

33. Какому процессу способствует повышение основности конечного шлака? Какие свойства шлака при этом ухудшаются?
34. Перечислите функции топлива в доменной печи.
35. В чем заключается особенность горения кокса в доменной печи? Запишите реакцию горения углерода кокса в доменной печи.
36. На каком расстоянии по оси воздушной фурмы процесс горения кокса заканчивается?
37. Какова величина теоретической температуры горения? Какая температура должна быть по оси печи (в области горна)?
38. Рассчитайте состав горнового газа при содержании кислорода в дутье 30 % и расходе природного газа 10 % от расхода дутья, принимая допущение о составе природного газа (100 % CH_4).
39. Почему при увеличении количества подаваемого в печь дутья растет производительность печи?
40. Каковы основные отличия в составах горнового и колошниковых газов?
41. Дайте определение понятию «кажущаяся теплоемкость материала». Как и за счет каких процессов она меняется по высоте печи?
42. Укажите роль зоны замедленного теплообмена в доменном процессе.
43. Какой процесс определяет температурную границу верхней и нижней зон теплообмена?
44. Развитие каких процессов доменной плавки определяет тепловой режим верхней ступени теплообмена?
45. Развитие каких процессов доменной плавки определяет тепловой режим нижней ступени теплообмена?
46. Укажите причины плавного и непрерывного движения шихтовых материалов.
47. Укажите обязательное условие плавного и непрерывного движения материалов в печи.
48. Чем определяются пределы форсирования доменной плавки дутьем?
49. Какие мероприятия позволяют сохранять перепад давления по высоте печи при повышении расхода дутья в целях интенсификации доменной плавки?
50. Что является причиной движения газов?

3. Балансовые расчеты доменной плавки

3.1. Общий материальный баланс доменной плавки

Общий материальный баланс доменной плавки составляется на 1 т готовой продукции — чугуна, состоит из двух частей — приходной и расходной и представляется в виде таблицы (см. ниже).

Общий материальный баланс доменной плавки

Приход			Расход		
Статья	кг/т	%	Статья	кг/т	%
Агломерат	1020	60	Чугун	1000	27
Окатыши	680	40	Шлак	300	8
Всего ЖРМ	1700	45	Колошниковый газ	2420	65
Кокс	350	10			
Дутье	1600	43			
Природный газ	70	2			
Итого	3720	100	Итого	3720	100

Приходная часть включает в себя количество (в килограммах на 1 т чугуна) железорудной части шихты, флюсующих материалов, если они не входят в состав железорудной части, кокса, дутья и дутьевых добавок. В расходной части фиксируется количество продуктов плавки: чугуна, шлака, колошникового газа. Графическое изображение материального баланса дает представление о соотношении материалов и продуктов доменной плавки (см. рисунок на с. 110).

Для составления материального баланса плавки необходимо рассчитать расходы шихтовых материалов и дутья, определить выход шлака и колошникового газа на производство 1 т чугуна. Методики расчета, основанные на законе сохранения массы веществ, приведены ниже.

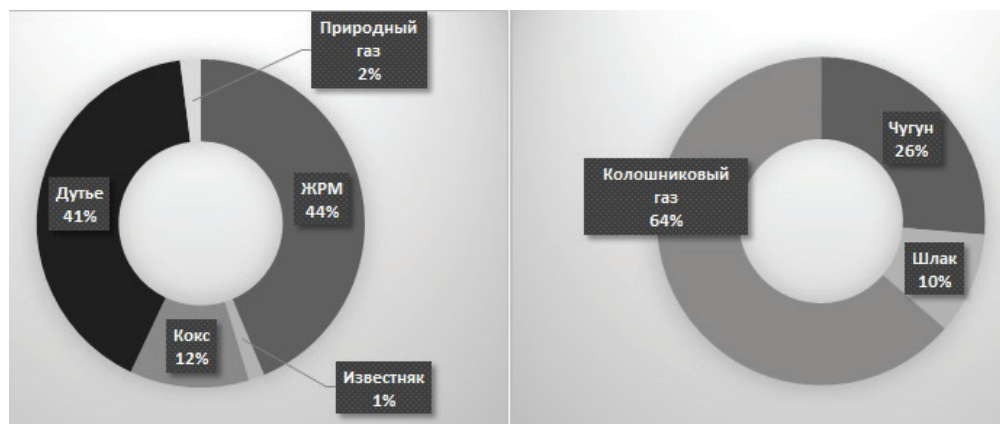


Диаграмма «Материальный баланс доменной плавки»

3.2. Расчет доменной шихты

Материальные балансы отдельных элементов и соединений (железа, марганца, фосфора, оксидов кремния, оксидов кальция) лежат в основе расчета состава доменной шихты.

Рассчитать доменную шихту — значит определить необходимое соотношение компонентов доменной шихты (железорудных материалов, флюсов, кокса) для получения чугуна заданного состава. Расчет выполняется на 1 т чугуна.

Заданный состав чугуна, как правило, определяется маркой выплавляемого чугуна. ГОСТ 803—80 на чугун регламентирует допустимые значения содержания элементов в чугуне, определяя марку, группу, класс, категорию чугуна. Для расчета состава шихты необходимо выбрать конкретные значения содержания кремния, углерода и серы из диапазона значений, указанных в ГОСТе. Содержание таких элементов в чугуне определяется температурным, шлаковым режимом процесса и в балансовых расчетах должно быть задано. Содержание других элементов в чугуне определяется их поступлением с шихтовыми материалами и будет в дальнейшем определено в результате расчета химического состава чугуна и шлака.

Для получения чугуна заданного состава необходимо обеспечить надлежащие свойства шлака и тепловой режим работы доменной печи.

Свойства шлака определяются его химическим составом и во многом зависят от основности шлака, то есть для получения доменного шлака надлежащих свойств необходимо получить шлак требуемой основности. Доменные шлаки имеют основность 1,05–1,25.

Тепловой режим зависит от удельного расхода кокса, который определяется потребностью процесса как в тепле, так и в восстановителе. Удельный расход кокса в зависимости от принятой на печах технологии может существенно отличаться — 250...400 кг/т, но для конкретной печи, работающей в стабильных сырьевых условиях, меняется в небольшом диапазоне. При выполнении расчета шихты расход кокса принимают в соответствии с практическими данными о работе печи.

Таким образом, задача расчета шихты сводится к определению количества железорудных материалов, обеспечивающих получение 1 т чугуна, и количества флюсов, обеспечивающих получение шлака заданной основности.

Принимая во внимание, что железо в ходе доменной плавки восстанавливается и переходит в чугун практически полностью (степень перехода железа в чугун 99,8 %), определение расхода железорудных материалов для получения 1 т чугуна основано на балансе железа:

$$0,01(R_{\text{ЖРМ}}\text{Fe}_{\text{ЖРМ}} + R_{\text{ФЛ}}\text{Fe}_{\text{ФЛ}} + R_{\text{К}}\text{Fe}_{\text{К}})\eta_{\text{Fe}} = [\text{Fe}]. \quad (3.1)$$

Баланс железа (3.1) дополняется аналогичными балансами марганца и фосфора, элементы, содержание которых в чугуне определяется их поступлением с шихтовыми материалами:

$$0,01(R_{\text{ЖРМ}}\text{Mn}_{\text{ЖРМ}} + R_{\text{ФЛ}}\text{Mn}_{\text{ФЛ}} + R_{\text{К}}\text{Mn}_{\text{К}})\eta_{\text{Mn}} = [\text{Mn}], \quad (3.2)$$

$$0,01(R_{\text{ЖРМ}}\text{P}_{\text{ЖРМ}} + R_{\text{ФЛ}}\text{P}_{\text{ФЛ}} + R_{\text{К}}\text{P}_{\text{К}})\eta_{\text{P}} = [\text{P}], \quad (3.3)$$

где R — удельный расход шихтового материала, т/т; Fe, Mn, P — содержание железа, марганца, фосфора в шихтовом материале, %; η — степень перехода соответствующего элемента в чугун, %.

Степень перехода марганца в чугун составляет 40–60 %, фосфора — 100 %.

Учитывая, что сумма содержания всех элементов в чугуне равна 100 %,

$$[\text{Fe}] + [\text{Mn}] + [\text{P}] + [\text{Si}] + [\text{S}] + [\text{C}] = 100$$

или

$$[\text{Fe}] + [\text{Mn}] + [\text{P}] = 100 - [\text{Si}] - [\text{S}] - [\text{C}],$$

в результате суммирования уравнений (3.1)–(3.3) получим уравнение по выходу чугуна

$$R_{\text{ЖРМ}} e_{\text{ЖРМ}} + R_{\text{ФЛ}} e_{\text{ФЛ}} + R_{\text{К}} e_{\text{К}} = 1, \quad (3.4)$$

где e — теоретический выход чугуна из шихтового материала, т/т:

$$e = \frac{\text{Fe} \eta_{\text{Fe}} + \text{Mn} \eta_{\text{Mn}} + \text{P} \eta_{\text{P}}}{100 - [\text{Si}] - [\text{S}] - [\text{C}]}. \quad (3.5)$$

Расчет количества флюсов основан на определении основности шлака и использовании балансов оксидов кальция и кремния.

Основность рассчитывается по уравнению

$$B = \frac{(\text{CaO})}{(\text{SiO}_2)}. \quad (3.6)$$

Баланс оксида кальция: оксид кальция в ходе доменной плавки не восстанавливается и полностью переходит в шлак:

$$R_{\text{ЖРМ}} \text{CaO}_{\text{ЖРМ}} + R_{\text{ФЛ}} \text{CaO}_{\text{ФЛ}} + R_{\text{К}} \text{CaO}_{\text{К}} = \text{Ш}(\text{CaO}), \quad (3.7)$$

где Ш — выход шлака, т/т.

Баланс оксида кремния: оксид кремния частично восстанавливается и распределяется между чугуном и шлаком. Количество оксида кремния, восстановившегося в чугун, определяется содержанием кремния в чугуне:

$$R_{\text{ЖРМ}} \text{SiO}_{2\text{ЖРМ}} + R_{\text{ФЛ}} \text{SiO}_{2\text{ФЛ}} + R_{\text{К}} \text{SiO}_{2\text{К}} = \text{Ш}(\text{SiO}_2) + \frac{28+32}{28} [\text{Si}]. \quad (3.8)$$

Использование балансов оксидов кремния и кальция позволяет получить выражения для расчета содержания этих оксидов в шлаке, тогда уравнение (3.6) с учетом уравнений (3.7) и (3.8) можно записать в виде

$$R_{\text{ЖРМ}} RO_{\text{ЖРМ}} + R_{\text{ФЛ}} RO_{\text{ФЛ}} + R_{\text{К}} RO_{\text{К}} = 0, \quad (3.9)$$

где RO — избыток (недостаток) оснований для каждого шихтового материала, который характеризует достаточность (или избыток) оксида кальция для получения шлака заданной основности и рассчитывается по формуле

$$RO = CaO - B \cdot SiO_2 + 2,14[Si]B \cdot e, \quad (3.10)$$

где CaO, SiO_2 — содержание оксидов кремния, кальция в шихтовом материале, %; B — основность доменного шлака, %/ %.

С учетом вышесказанного расчет шихты выполняется в следующей последовательности:

- расчет характеристик каждого шихтового материала — избытка (недостатка) оснований и выхода чугуна по формулам (3.5) и (3.10);
- составление и решение системы линейных уравнений (3.4) и (3.9) относительно расходов ЖРМ и флюса.

3.3. Расчет выхода и состава чугуна и шлака

Расчет позволяет определить состав получаемого чугуна, состав доменного шлака и сделать вывод о возможности выплавки чугуна заданного качества из указанных железорудных материалов.

Для определения состава чугуна и шлака необходимо предварительно рассчитать количество всех элементов и оксидов, поступающих с шихтовыми материалами, и учесть изменение их количества в результате процессов, происходящих при доменной плавке.

Количество каждого элемента или химического соединения, поступившего с шихтовыми материалами, определится по формулам вида

$$M_X = 0,01(R_{ЖРМ}X_{ЖРМ} + R_{ФЛ}X_{ФЛ} + R_KX_K),$$

где M_X — количество элемента (соединения) X , поступившего с шихтовыми материалами, т/т; X — содержание элемента (химического соединения) X в шихтовом материале, %.

В процессе доменной плавки частично улетучивается сера. Количество улетучившейся серы определяется по формуле

$$M_S^{ул} = 0,01M_S\lambda_S,$$

где $M_S, M_S^{ул}$ — количество серы, поступившей с шихтовыми материалами и улетучившейся в процессе доменной плавки соответственно, т/т; λ_S — степень улетучивания серы 5–10 %.

В процессе плавки также полностью улетучиваются CO_2 из карбонатов и H_2O гидратов шихтовых материалов. Общее количество улетучившихся соединений можно учесть через потери массы при прокаливании.

$$M_{\text{ПМПП}}^{\text{ул}} = M_{\text{ПМПП}},$$

где $M_{\text{ПМПП}}$, $M_{\text{ПМПП}}^{\text{ул}}$ — количество CO_2 и H_2O , поступивших с шихтовыми материалами и улетучившихся в процессе доменной плавки, т/т.

Все остальные элементы распределяются между жидкими продуктами плавки — шлаком и чугуном.

Расчет выхода и состава чугуна. Рассчитать состав чугуна — значит определить количество элементов, перешедших в одну тонну чугуна.

Зная содержание углерода, серы и кремния в чугуне, можно определить их количество в 1 тонне чугуна по уравнениям вида

$$M_X^{\text{чуг}} = 0,01[X],$$

где $[X]$ — содержание одного из элементов в чугуне, %.

Количество остальных элементов, перешедших в чугун (Fe, Mn, P), определится их количеством, вносимым с шихтовыми материалами, с учетом степени перехода элементов в чугун. Так, например, количество железа, перешедшего в чугун, рассчитывается по формуле

$$M_{\text{Fe}}^{\text{чуг}} = 0,01M_{\text{Fe}}\eta_{\text{Fe}},$$

где M_{Fe} , $M_{\text{Fe}}^{\text{чуг}}$ — количество железа, поступившего с шихтовыми материалами и перешедшего в чугун соответственно, т/т.

При правильно выполненном расчете и достоверном составе шихтовых материалов сумма значений элементов, входящих в состав чугуна (Fe, C, Si, S, Mn, P, Ti, V, Cu), то есть масса чугуна, должна быть равна 1 т.

Содержание элементов в чугуне (химический состав чугуна) определяется по формуле

$$[X] = \frac{M_X^{\text{чуг}}}{M^{\text{чуг}}} \cdot 100,$$

где $M^{\text{чуг}}$ — масса чугуна, кг.

Расчет выхода и состава шлака. Шлак — это вступившие во взаимодействие оксиды пустой породы и невосстановившиеся оксиды металлов (Fe, Mn, Ti и т. п.).

Количество химических соединений, перешедших в шлак, определяется их поступлением с шихтовыми материалами с учетом степени перехода элементов в шлак.

Оксиды Al_2O_3 , CaO , MgO в доменной печи не восстанавливаются и полностью переходят в шлак, следовательно, их количество в шлаке равно поступлению с шихтовыми материалами.

Оксиды FeO , Fe_2O_3 , SiO_2 , MnO в доменной печи в большей или меньшей степени восстанавливаются. Невосстановившиеся оксиды переходят в шлак. Их количество определяется по формулам

$$M_{\text{FeO}}^{\text{шлак}} = 0,01M_{\text{Fe}}(100 - \eta_{\text{Fe}}) \frac{m_{\text{Fe}} + m_{\text{O}}}{m_{\text{Fe}}},$$

$$M_{\text{MnO}}^{\text{шлак}} = 0,01M_{\text{Mn}}(100 - \eta_{\text{Mn}}) \frac{m_{\text{Mn}} + m_{\text{O}}}{m_{\text{Mn}}},$$

$$M_{\text{SiO}_2}^{\text{шлак}} = M_{\text{SiO}_2} - M_{\text{Si}}^{\text{чуг}} \frac{m_{\text{Si}} + 2m_{\text{O}}}{m_{\text{Si}}}.$$

Сера в доменной печи частично улетучивается, частично переходит в чугун. Остальная сера в процессе десульфурации чугуна переходит в шлак в виде CaS . Количество в шлаке рассчитывается по формуле

$$M_{\text{S}}^{\text{шлак}} = M_{\text{S}} - M_{\text{S}}^{\text{ул}} - M_{\text{S}}^{\text{чуг}}.$$

Выход шлака — количество шлака, образующегося при производстве 1 тонны чугуна, определяется суммарным количеством оксидов и сульфидов в шлаке.

Содержание элементов и химических соединений в шлаке (химический состав шлака) определяется по формуле

$$(X) = \frac{M_X^{\text{шлак}}}{\text{Ш}} \cdot 100,$$

где Ш — выход шлака, т/т чугуна.

3.4. Расчет расхода дутья

Поступление кислорода с дутьем $V_{O_2}^{уд}$ должно обеспечивать потребность процесса в кислороде:

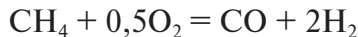
$$V_{O_2}^{уд} = V_{д}^{уд} (w_{д} + 0,5\varphi_{д}), \quad (3.11)$$

где $V_{д}^{уд}$ — расход дутья, м³/т; $w_{д}$ — количество кислорода в дутье, м³/м³; $\varphi_{д}$ — количество паров воды в дутье, м³/м³:

$$w_{д} = \frac{O_2^д}{100},$$

$$\varphi_{д} = \frac{H_2O^д}{1000} \frac{22,4}{18}.$$

Потребность процесса в кислороде определяется реакциями горения углерода кокса и конверсии природного газа



и составляет

$$V_{O_2}^{уд} = 0,5(C_K^{\phi} + (C)_{пг} V_{пг}^{уд}), \quad (3.12)$$

где C_K^{ϕ} — количество углерода кокса, пришедшее к фурмам, кг/т; $V_{пг}^{уд}, (C)_{пг}$ — расход природного газа, м³/т, и содержание в нем углерода, м³/м³. Принимая допущение о составе природного газа 100 % CH₄, получим содержание углерода в природном газе 1 м³/м³.

Количество углерода кокса, пришедшее к фурмам G_C^{ϕ} , т/т, определяется общим поступлением углерода с коксом G_C^K за минусом его расхода на науглероживание чугуна $G_C^{чуг}$, прямое восстановление оксидов железа G_C^{Fe} и примесей чугуна $G_C^{эл}$.

$$G_C^{\phi} = G_C^K - G_C^{чуг} - G_C^{Fe} - G_C^{эл},$$

$$G_C^K = \frac{22,4}{12} K \frac{C^K}{100},$$

$$G_c^{\text{чуг}} = \frac{22,4}{12} 10[C],$$

$$G_c^{\text{Fe}} = 4[\text{Fe}]r_d,$$

$$G_c^{\text{эл}} = 224 \left(\frac{[\text{Mn}]}{55} + \frac{2[\text{Si}]}{28} + \frac{5}{2} \frac{[\text{P}]}{31} \right),$$

где K — удельный расход кокса, т/т; C^K — содержание углерода в коксе, %; r_d — степень прямого восстановления, доли ед. Степень прямого восстановления на современных доменных печах составляет 0,25–0,30 доли ед.

Определив количество углерода, пришедшего к фурмам, и зная расход и состав природного газа, по формулам (3.11) и (3.12) можно рассчитать расход сухого дутья.

В таблицу материального баланса (см. с. 109) плавки заносятся значения массы влажного дутья. Для ее расчета надо знать плотность сухого дутья и массу паров воды.

Плотность сухого дутья рассчитывается по формуле

$$\rho_d^{\text{сух}} = \frac{1}{22,4} (32w_d + 28(1 - w_d)).$$

Масса влажного дутья $G_d^{\text{вл}}$, кг/т, определяется по уравнению

$$G_d^{\text{вл}} = V_d^{\text{уд}} \left(\rho_d^{\text{сух}} + \frac{18}{22,4} \phi_d \right).$$

3.5. Расчет выхода и состава колошникового газа

Основное количество газа ($\text{N}_2, \text{CO}, \text{H}_2$) образуется при горении топлива у фурм.

В результате горения углерода на фурмах образуется монооксид углерода в количестве

$$V_{\text{CO}}^{\Phi} = V_d^{\text{уд}} (2w_d + \phi_d).$$

Количество водорода определяется влажностью дутья и расходом углеводородных добавок

$$V_{H_2}^{\Phi} = (H_2)_{\text{ПГ}} V_{\text{ПГ}}^{\text{уд}} + V_{\text{Д}}^{\text{уд}} \phi_{\text{Д}},$$

где $(H_2)_{\text{ПГ}}$ — содержание водорода в природном газе, $\text{м}^3/\text{м}^3$. Принимая допущение о составе природного газа (100 % CH_4), получим содержание водорода в природном газе $2 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Количество азота рассчитываем по формуле

$$V_{N_2}^{\Phi} = V_{\text{Д}}^{\text{уд}} (1 - w_{\text{Д}}).$$

Общее количество газа, образующегося при горении топлива у фурм, рассчитывается как

$$V_{\Gamma}^{\Phi} = V_{\text{CO}}^{\Phi} + V_{H_2}^{\Phi} + V_{N_2}^{\Phi}.$$

Состав фурменного газа рассчитывается по формулам

$$N_2^{\Gamma} = 100 \frac{V_{N_2}^{\text{уд}}}{V_{\Gamma}^{\text{уд}}}, \quad \text{CO}^{\Gamma} = 100 \frac{V_{\text{CO}}^{\text{уд}}}{V_{\Gamma}^{\text{уд}}}, \quad H_2^{\Gamma} = 100 \frac{V_{H_2}^{\text{уд}}}{V_{\Gamma}^{\text{уд}}}.$$

При движении продуктов горения вверх к ним присоединяется монооксид углерода, образующийся при прямом восстановлении оксидов железа и примесей чугуна в количестве

$$V_{\text{CO}}^{\text{ПВ}} = G_{\text{C}}^{\text{Fe}} + G_{\text{C}}^{\text{эл}} = 4[\text{Fe}]r_d + 224 \left(\frac{[\text{Mn}]}{55} + \frac{2[\text{Si}]}{28} + \frac{5[\text{P}]}{2 \cdot 31} \right).$$

В верхней части печи, в зоне косвенного восстановления, общее количество газа может несколько увеличиваться только за счет разложения карбонатов, гидратов и испарения влаги. В этой части печи происходит, главным образом, изменение состава газа. За счет процессов косвенного восстановления CO и H_2 превращаются в CO_2 и H_2O в количестве

$$V_{H_2O}^{\text{КГ}} = V_{H_2}^{\Phi} \eta_{H_2},$$

$$V_{\text{CO}_2}^{\text{КГ}} = \frac{224}{160} R_{\text{ЖРМ}} \left(\text{Fe}_{\text{ЖРМ}} - \frac{56}{72} \text{FeO}_{\text{ЖРМ}} \right) + 4[\text{Fe}](1 - r_d) - V_{H_2O}^{\text{КГ}},$$

где $V_{\text{CO}_2}^{\text{КГ}}$ — количество CO_2 в колошниковом газе, $\text{м}^3/\text{т}$; η_{H_2} — степень использования водорода, 0,4 %/%; $R_{\text{ЖРМ}}$ — удельный расход железорудного материала, $\text{кг}/\text{т}$; $\text{Fe}_{\text{ЖРМ}}$, $\text{FeO}_{\text{ЖРМ}}$ — общее содержание железа и содержание FeO в железорудном материале соответственно, %; $V_{H_2O}^{\text{КГ}}$ — количество паров воды в колошниковом газе, $\text{м}^3/\text{т}$.

Следовательно, количество CO и H_2 в колошниковом газе уменьшится, и его можно рассчитать как

$$V_{\text{CO}}^{\text{КГ}} = V_{\text{CO}}^{\Phi} + V_{\text{CO}}^{\text{ПВ}} - V_{\text{CO}_2}^{\text{КГ}},$$

$$V_{\text{H}_2}^{\text{КГ}} = V_{\text{H}_2}^{\Phi} - V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{КГ}}.$$

Азот — нейтральный газ, и его количество по высоте печи не меняется:

$$V_{\text{N}_2}^{\text{КГ}} = V_{\text{N}_2}^{\Phi}.$$

Выход сухого колошникового газа рассчитывается как

$$V_{\text{КГ}} = V_{\text{N}_2}^{\text{КГ}} + V_{\text{CO}}^{\text{КГ}} + V_{\text{H}_2}^{\text{КГ}} + V_{\text{CO}_2}^{\text{КГ}}.$$

Состав колошникового газа определяется по формулам

$$\text{N}_2^{\text{КГ}} = 100 \frac{V_{\text{N}_2}^{\text{КГ}}}{V_{\text{КГ}}}, \text{CO}^{\text{КГ}} = 100 \frac{V_{\text{CO}}^{\text{КГ}}}{V_{\text{КГ}}}, \text{CO}_2^{\text{КГ}} = 100 \frac{V_{\text{CO}_2}^{\text{КГ}}}{V_{\text{КГ}}}, \text{H}_2^{\text{КГ}} = 100 \frac{V_{\text{H}_2}^{\text{КГ}}}{V_{\text{КГ}}}.$$

Важным параметром состава колошникового газа, характеризующим полноту протекания реакций косвенного восстановления оксидов железа, является степень использования CO :

$$\eta_{\text{CO}} = \frac{\text{CO}_2^{\text{КГ}}}{\text{CO}^{\text{КГ}} + \text{CO}_2^{\text{КГ}}}.$$

Влажность колошникового газа $\varphi_{\text{КГ}}$, $\text{м}^3/\text{м}^3$, рассчитывается по формуле

$$\varphi_{\text{КГ}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{КГ}}}{V_{\text{КГ}}}.$$

Зная состав сухого колошникового газа и его влажность, можно рассчитать плотность сухого колошникового газа и массу влажного колошникового газа:

$$\rho_{\text{КГ}}^{\text{сух}} = \frac{1}{22,4} (28\text{N}_2^{\text{КГ}} + 28\text{CO}^{\text{КГ}} + 44\text{CO}_2^{\text{КГ}} + 2\text{H}_2^{\text{КГ}}),$$

$$G_{\text{КГ}}^{\text{вл}} = V_{\text{КГ}} \left(\rho_{\text{КГ}}^{\text{сух}} + \frac{18}{22,4} \varphi_{\text{КГ}} \right).$$

3.6. Общий тепловой баланс доменной плавки

Удельный расход кокса является важным показателем доменной плавки, поэтому необходимо изыскать пути, ведущие к его сокращению. Самым простым и наиболее целесообразным для оценки тепловой работы доменной печи всегда являлся и продолжает служить этой цели анализ теплового баланса доменной печи.

Тепловой баланс плавки отражает тепловую работу доменной печи в самом общем виде. При составлении теплового баланса учитываются все источники и затраты тепла на производство 1 т чугуна.

При выплавке чугуна необходимо затратить от 6000 до 9000 МДж/т чугуна. Меньший расход тепла будет при производстве передельного чугуна, больший — литейного чугуна. При выплавке специальных чугунов (ферросплавов) расход тепла будет еще больше.

Тепловой баланс, как правило, представлен в табличной форме с левой и правой частью, включающими в себя соответственно статьи прихода и расхода тепла. Расчет теплового баланса ведется по реальным тепловым эффектам.

Тепловой баланс, %

Номер статьи	Приход	Тепло, %	Номер статьи	Расход	Тепло, %
1	Горение углерода кокса	50–60	1	Прямое восстановление железа	10–20
2	Теплосодержание нагретого дутья	35–45	2	Прямое восстановление примесей чугуна	4–8
3	Конверсия природного газа	3–4	3	Испарение и разложение влаги шихты	3–7
4	Процессы шлакообразования, косвенного восстановления оксидов железа, марганца	1–3	4	Разложение карбонатов	8–12
			5	Разложение влаги дутья	2–4
			6	Теплосодержание чугуна	10–20
			7	Теплосодержание шлака	15–20
			8	Теплосодержание колошниковых газов	15–20
			9	Потери тепла через кладку и с охлаждающей водой	10–20

3.7. Анализ теплового баланса

Приходные статьи баланса

Как видно из теплового баланса, источниками тепла в доменной печи являются, главным образом, горение кокса и нагретое дутье. Приход тепла по двум указанным главным статьям можно выразить уравнением

$$Q_{1,2} = C_{\phi} (9830 + 4,45 t_{\text{д}} C_{\text{д}}), \quad (3.13)$$

где $Q_{1,2}$ — приход тепла по статьям 1 и 2 теплового баланса, МДж/т чугуна; C_{ϕ} — количество углерода, сгорающего у фурм, кг/т чугуна; 9830 и 4,45 — соответственно тепловой эффект горения углерода, кДж/кг С и расход дутья на 1 кг углерода, м³/кг С; $t_{\text{д}}$ — температура дутья, °С; $C_{\text{д}}$ — теплоемкость дутья, кДж/(м³·°С).

В соответствии с уравнением (3.13), при повышении температуры дутья для того, чтобы приход тепла не превысил расхода (т. е. потребности процесса в тепле), необходимо сократить количество углерода, сгорающего у фурм, то есть расход кокса.

Таким образом, главное мероприятие по приходной части баланса, направленное на снижение удельного расхода кокса, — это повышение температуры горячего дутья. Средняя по доменным печам температура, в зависимости от конструкции и режима работы воздухонагревателей, составляет 1100 °С, максимальная — 1350 °С. Нагрев дутья является экономически целесообразным, так как для нагрева в качестве топлива используется колошниковый газ.

Второе мероприятие по приходной части баланса, направленное на снижение расхода кокса, — это увеличение подачи в печь углеводородных добавок: природного газа, пылеугольного топлива.

В горне доменной печи при подаче природного газа протекают следующие процессы:



Увеличение расхода природного газа приводит к увеличению количества восстановительных газов и способствует косвенному восстановлению оксидов железа.

Однако тепловой эффект конверсии природного газа существенно ниже теплового эффекта горения углерода. Данный фактор и, кроме того, увеличение объема продуктов горения приводят к снижению температуры фурменного очага.

Суммарный результат вдувания углеводородных добавок может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от их свойств и количества. Так, увеличение расхода природного газа сверх $130 \text{ м}^3/\text{т}$ приводит к снижению нагрева горна и ухудшению газодинамических параметров плавки.

Расходные статьи баланса

1. Основные мероприятия, направленные на снижение потребности процесса в тепле, связаны с повышением восстановимости железорудного материала:

- использование подготовленных железорудных материалов (агломерата, окатышей);
- повышение восстановительного потенциала газового потока (повышение концентрации CO , H_2 в газе путем обогащения дутья кислородом, вдувания природного газа);
- повышение температуры в верхней части печи и т. д.

2. Единственное мероприятие по сокращению затрат по второй статье теплового баланса — это снижение объемов или прекращение выплавки в доменных печах специальных чугунов, чугунов с повышенным содержанием марганца, кремния, литейных чугунов.

3. Все шихтовые материалы обладают большей или меньшей гигроскопичностью. При хранении на складах они поглощают влагу из атмосферы или увлажняются осадками. Количество этой гигроскопичной влаги в материалах обычно невелико (составляет 3–4 %).

Для снижения затрат тепла по этой статье теплового баланса целесообразно предварительно дегидрировать материал вне доменной печи, например, в процессе агломерации. При использовании предварительно подготовленного сырья доля этой статьи расходной части теплового баланса практически равна 0.

4. Из карбонатов в доменную печь в наибольшем количестве поступает известняк CaCO_3 , при разложении которого образуется оксид кальция, необходимый для получения шлака из пустой породы руд и золы топлива. Загрузка в доменные печи известняка приводит

к увеличению удельного расхода топлива за счет замедления косвенного восстановления, больших затрат тепла на разложение известняка и дополнительного расхода углерода на восстановление выделяющейся при этом двуокиси углерода.

Для снижения затрат тепла по данной статье теплового баланса целесообразно использовать офлюсованные железорудные материалы — агломераты и окатыши.

Современная технология доменной плавки предусматривает использование предварительно подготовленных к плавке железорудных материалов. Для получения шлака заданных свойств корректируется основность шихты: изменяется соотношение агломератов и окатышей, имеющих различную основность.

5. При оценке влияния влажности дутья на доменный процесс следует учитывать, что образующийся в результате разложения паров воды водород повышает индекс косвенного восстановления, что является положительным фактором:



Корректировка влажности дутья осуществляется добавкой к атмосферному дутью пара. Однако существует ограничение по влажности дутья — 20 г/м^3 . Выше данного значения происходит существенное снижение нагрева печи, и следовательно, требуется увеличение расхода кокса.

6. Теплосодержание чугуна определяется его составом.

7. Теплосодержание шлака $Q_{\text{ш}}$, кДж/кг, оценивается по формуле

$$Q_{\text{ш}} = c_{\text{ш}} t_{\text{ш}} \text{Ш},$$

где $c_{\text{ш}}, t_{\text{ш}}$ — теплоемкость и температура шлака соответственно, кДж/(кг·°С) и °С; Ш — выход шлака, кг/т.

Снизить затраты тепла по данной статье можно, снижая выход шлака.

Использование обогащенного железорудного сырья (агломерата, окатышей) позволяет снизить содержание пустой породы и, следовательно, выход шлака.

Большой выход шлака необходим для успешной десульфурации чугуна, поэтому внедоменная десульфурация позволяет также сократить расходы тепла по данной статье.

8. Возможности сокращения затрат тепла по статье «Теплосодержание колошникового газа» связаны со снижением температуры колошникового газа за счет оптимизации тепловых процессов в доменной печи и весьма ограниченно используется.

9. Удельные потери тепла через систему охлаждения определяются интенсивностью плавки. Расход тепла по данной статье можно уменьшить, увеличивая размеры печи и ее производительность и обеспечивая сохранность огнеупорной кладки. Увеличивая объем печи, можно уменьшить относительную площадь поверхности кладки. Увеличивая производительность печи, можно сократить удельные потери тепла.

Контрольные вопросы к главе 3

1. Перечислите основные статьи прихода тепла в доменной печи.
2. Перечислите основные статьи расходной части теплового баланса.
3. Каковы основные мероприятия по снижению удельного расхода кокса (на основе приходных статей теплового баланса)?
4. Опишите основные мероприятия для снижения удельного расхода кокса (на основе расходных статей теплового баланса).
5. Какие статьи расходной части теплового баланса существенно сократятся или вообще исчезнут, если будем использовать в шихте агломерат, окатыши и кокс?

Рекомендуемый библиографический список

Доменное производство : справочник: В 2 ч. Ч. 1. Подготовка руд и доменный процесс / И. Д. Балон [и др.] ; под ред. Е. Ф. Вегмана. — Москва: Металлургия, 1989. — 491 с. — ISBN 5-229-00055-4.

Коротич, В. И. Металлургия черных металлов : учебник / В. И. Коротич, С. Г. Братчиков. — Москва : Металлургия, 1987. — 239 с.

Металлургия чугуна : учебник / Е. Ф. Вегман, Б. Н. Жеребин, А. Н. Похвиснев [и др.] ; под ред. Ю. С. Юсфина. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва : Академкнига, 2004. — 774 с. — ISBN 5-94628-120-8.

Начала металлургии : учебник для вузов / В. И. Коротич, С. С. Набойченко, А. И. Сотников [и др.] ; под общ. ред. В. И. Коротича. — Екатеринбург : УГТУ, 2000. — 392 с. — ISBN 5-230-006611-3.

Основы теории и технологии доменной плавки / А. Н. Дмитриев, Н. С. Шумаков, Л. И. Леонтьев, О. П. Онорин. — Екатеринбург : УрО РАН, 2005. — 545 с. — ISBN 5-7691-1588-2.

Приложение

Химические составы чугунов по ГОСТ 805—80

Марка чугуна	Si, %	Mn (по группам), %				P (по классам), %				S (по категориям), %				
		I	II	III	IV	A	Б	В	Г	I	II	III	IV	V
П1	0,5—0,9	≤ 0,5	0,5—1,0	1,0—1,5	—	≤ 0,10	≤ 0,20	≤ 0,30	—	≤ 0,01	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,04	≤ 0,05
П2	До 0,5	≤ 0,5	0,5—1,0	1,0—1,5	—	≤ 0,08	≤ 0,12	—	—	≤ 0,01	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,04	≤ 0,05
ПЛ1	0,8—1,0	≤ 0,3	0,3—0,5	0,5—0,9	0,9—1,5	≤ 0,08	≤ 0,12	—	—	≤ 0,01	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,04	≤ 0,05
ПЛ2	0,5—0,8	≤ 0,3	0,3—0,5	0,5—0,9	0,9—1,5	≤ 0,08	≤ 0,12	—	—	≤ 0,01	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,04	≤ 0,05
ПФ1	0,9—1,2	1,0	≤ 1,5	≤ 2,0	—	0,30— 0,70	0,70— 1,50	1,52,0	—	≤ 0,03	≤ 0,05	≤ 0,07	—	—
ПФ2	0,5—0,9	1,0	≤ 1,5	≤ 2,0	—	0,30— 0,70	0,70— 1,50	1,52,0	—	≤ 0,03	≤ 0,05	≤ 0,07	—	—
ПФ3	До 0,5	1,0	≤ 1,5	≤ 2,0	—	0,30— 0,70	0,70— 1,50	1,52,0	—	≤ 0,03	≤ 0,05	≤ 0,07	—	—
ПВК1	0,9—1,2	≤ 0,5	1,5—1,0	1,0—1,5	—	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,04	≤ 0,05	≤ 0,015	≤ 0,02	≤ 0,025	—	—
ПВК2	0,3—0,9	≤ 0,5	1,5—1,0	1,0—1,5	—	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,04	≤ 0,05	≤ 0,015	≤ 0,02	≤ 0,025	—	—
ПВК3	До 0,5	≤ 0,5	1,5—1,0	1,0—1,5	—	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,04	≤ 0,05	≤ 0,015	≤ 0,02	≤ 0,025	—	—
Л1	3,2—3,6	≤ 0,3	0,3—0,5	0,5—0,9	0,9—1,5	0,02	0,033	0,04	0,04	≤ 0,08	≤ 0,12	≤ 0,30	0,3— 0,7	0,70— 1,20
Л2	2,8—3,2	≤ 0,3	0,3—0,5	0,5—0,9	0,9—1,5	0,02	0,033	0,04	0,04	≤ 0,08	≤ 0,12	≤ 0,30	0,3— 0,7	0,70— 1,20
Л3	2,4—2,8	≤ 0,3	0,3—0,5	0,5—0,9	0,9—1,5	0,02	0,033	0,04	0,04	≤ 0,08	≤ 0,12	≤ 0,30	0,3— 0,7	0,70— 1,20
Л4	2,0—2,4	≤ 0,3	0,3—0,5	0,5—0,9	0,9—1,5	0,02	0,033	0,04	0,04	≤ 0,08	≤ 0,12	≤ 0,30	0,3— 0,7	0,70— 1,20
Л5	1,6—2,0	≤ 0,3	0,3—0,5	0,5—0,9	0,9—1,5	0,02	0,033	0,04	0,04	≤ 0,08	≤ 0,12	≤ 0,30	0,3— 0,7	0,70— 1,20
Л6	1,2—1,6	≤ 0,3	0,3—0,5	0,5—0,9	0,9—1,5	0,02	0,033	0,04	0,04	≤ 0,08	≤ 0,12	≤ 0,30	0,3— 0,7	0,70— 1,20

Учебное издание

Гилева Лариса Юрьевна,
Каплун Лев Исаакович,
Загайнов Сергей Александрович

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧУГУНА

Редактор И. В. Коршунова
Верстка О. П. Игнатьевой

Подписано в печать 16.11.2021. Формат 70×100/16.
Бумага офсетная. Цифровая печать. Усл. печ. л. 10,3.
Уч.-изд. л. 7,54. Тираж 30 экз. Заказ 238.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: +7 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: +7 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13
Факс: +7 (343) 358-93-06
<http://print.urfu.ru>

